中国电气工程大典编辑委员会

CHINA ELECTRICAL

中国电气工程大典

ENGINEERING CANON

第9卷

电机工程

主编 唐任远 顾国彪 秦 和 莫会成
沈梁伟 胡鉴清 黄国治

中国电力出版社
www.cepp.com.cn

组　编　中国电工技术学会
中国机械工程学会
中国电机工程学会
中国动力工程学会
中国水力发电工程学会

《中国电气工程大典》

- 第 1 卷　现代电气工程基础
- 第 2 卷　电力电子技术
- 第 3 卷　电气工程材料及器件
- 第 4 卷　火力发电工程 (上、下)
- 第 5 卷　水力发电工程
- 第 6 卷　核能发电工程
- 第 7 卷　可再生能源发电工程
- 第 8 卷　电力系统工程
- **第 9 卷　电机工程**
- 第10卷　输变电工程
- 第11卷　配电工程
- 第12卷　船舶电气工程
- 第13卷　交通电气工程
- 第14卷　建筑电气工程
- 第15卷　电气传动自动化

ISBN 978-7-5083-6610-4
9 787508 366104 >
定价：180.00元

CHINA ELECTRICAL

中国电气工程大典

ENGINEERING CANON

中国电气工程大典编辑委员会

第9卷

电机工程

主编　唐任远　顾国彪　秦　和　莫会成
沈梁伟　胡鉴清　黄国治

中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《中国电气工程大典》是由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电学会共同组织全国电气工程各领域的著名专家、学者编纂而成的。它是一部全面系统反映电气工程各领域最新成就和技术水平的综合性工具书。《中国电气工程大典》包括现代电气工程基础、电力电子技术、电气工程材料及器件、火力发电工程、水力发电工程、核能发电工程、可再生能源发电工程、电力系统工程、电机工程、输变电工程、配电工程、船舶电气工程、交通电气工程、建筑电气工程、电气传动自动化等15卷。

本书为第9卷，电机工程卷。主要内容包括电机通论、同步电机、感应电机、直流电机和特种电机。

本书主要供电气工程领域技术人员和管理人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

中国电气工程大典. 第9卷，电机工程 / 中国电气工程大典编辑委员会编. —北京：中国电力出版社，2008
ISBN 978-7-5083-6610-4

Ⅰ. 中… Ⅱ. 中… Ⅲ. ①电气工程-中国②电机-中国 Ⅳ. TM

中国版本图书馆CIP数据核字（2008）第008337号

责任编辑：周 娟 杨淑玲 版式设计：张秋雁
封面设计：郑小平 王英磊 责任校对：罗凤贤
责任印制：甄 茁

中国电力出版社出版发行
（北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn）
北京盛通印刷股份有限公司印刷
各地新华书店经售

2008年10月第1版 2008年10月北京第1次印刷
880mm×1230mm 1/16 · 56.25印张 · 2500千字 · 2插页
定价 **180.00** 元

敬 告 读 者
本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换
版 权 专 有 翻 印 必 究

编辑委员会



主任：陆燕荪



主任：陆延昌



执行主任：周鹤良



执行主任：宋天虎



电机工程卷主编



唐任远
中国工程院院士、
沈阳工业大学教授



顾国彪
中国工程院院士、
中国科学院电工所研究员



秦　和
上海电器科学研究所原所长、
教授级高工



莫会成
西安微电机研究所所长、
研 究 员



沈梁伟
哈尔滨大电机研究所原副总
工程师、教授级高工



胡鉴清
哈尔滨电站工程公司原总经理、
教授级高工



黄国治
上海电器科学研究所原副总
工程师、教授级高工



哈尔滨电机厂有限责任公司制造的1000MW汽轮发电机



哈尔滨电机厂有限责任公司自主研制的世界上容量最大的840MVA三峡全空冷水轮发电机



西安微电机研究所为神舟系列配套电机



西安微电机研究所为嫦娥一号配套电机

中国电气工程大典

编 辑 委 员 会

主　　任：陆燕荪　原机械工业部副部长、教授级高级工程师
　　中国机械工程学会名誉理事长
　　陆延昌　原电力工业部副部长、教授级高级工程师
　　中国电机工程学会理事长
执行主任：周鹤良　原机械工业部电工局局长、教授级高级工程师
　　中国电工技术学会名誉理事长
　　宋天虎　原机械工业部科技司司长、教授级高级工程师
　　中国机械工程学会常务副理事长
副 主 任：潘崇义　中国电工技术学会副理事长、教授级高级工程师
　　吴玉生　中国电机工程学会秘书长、教授级高级工程师
　　邴凤山　中国水力发电工程学会副理事长、教授级高级工程师
　　严宏强　中国动力工程学会秘书长、教授级高级工程师
　　宗　健　中国电力出版社有限公司董事长、总经理、编审
秘 书 长：黄远东　中国电气工程大典编委会高级工程师
副秘书长：奚大华　中国电工技术学会期刊部主任、高级工程师
　　周　娟　中国电力出版社有限公司副总编、编审

委　　员：（按姓氏笔画排列）

丁　杰　卜广全　于　龙　于坤山　于　明　于新颖　马小亮　马文忠　马伟明　马伟斌
马旭东　马济泉　马晓茜　马隆龙　丰镇平　王之杰　王为民　王正鸣　王占奎　王永骥
王成山　王兆安　王志峰　王作民　王国海　王明渝　王金元　王学伟　王泽忠　王建生
王建华　王绍武　王春华　王厚余　王炳忠　王　勇　王素英　王振铭　王　乘　王维洲
王景芹　王　强　王锡凡　王新新　王黎明　王德宽　王赞基　文习山　文劲宇　方晓燕
方　磊　尹天文　邓长胜　孔　力　孔伯汉　孔昭年　石萍萍　卢　强　卢澎湖　叶奇蓁
田东强　田培斌　史进渊　史毓珍　白少林　白俊光　白晓民　白继彬　冯江华　司马文霞
邢馥吏　戎一农　吕征宇　吕鸿达　朱庆明　朱英浩　朱宝田　朱晓明　朱家驹　朱耀泉
仲明振　任兆宏　任修明　任俊生　危师让　邬　雄　刘大明　刘广峰　刘卫宁　刘友梅
刘公直　刘文华　刘平安　刘　伟　刘仲儒　刘希清　刘　杰　刘尚明　刘国林　刘泽洪
刘建飞　刘建明　刘屏周　刘瑛岩　刘德志　齐剑波　关志成　江秀臣　江哲生　池　涌
汤　涌　汤蕴林　祁恩兰　许江宁　许忠卿　许洪华　阮江军　阮新波　阮　毅　孙才新
孙凤杰　孙成群　孙　林　孙牧海　严宏强　严陆光　严俊杰　严　萍　苏秀苹　杜正春
杜毅威　杨玉岗　杨守权　杨寿敏　杨其国　杨奇逊　杨奇娟　杨怡元　杨俊智　杨　耕
杨维迟　杨　雯　杨道刚　杨德才　李　卫　李文健　李永东　李成榕　李　旭　李兴源
李安定　李　农　李若梅　李杰仁　李宝树　李定中　李　奎　李彦明　李晓明　李颂哲
李朗如　李培植　李盛涛　李崇坚　李道本　李道林　李　鹏　李　新　李肇林　李耀星
邢凤山　肖立业　肖昌汉　肖辉乾　肖湘宁　肖耀荣　吴正国　吴创之　吴运东　吴志坚
吴国平　吴质根　吴晓波　吴培豪　邱爱慈　何木云　何阿平　何金良　何梓年　何湘宁
何瑞华　佟为明　余　志　余贻鑫　邹云屏　邹金昌　邹孟奇　应百川　辛德培　辛耀中
汪继强　汪集旸　汪槱生　汪德良　沈小宇　沈　江　沈　兵　沈邱农　沈梁伟　宋文武
宋汉武　宋哲仁　迟　速　张艺滨　张文才　张玉花　张业广　张乔根　张仲超　张兆鹤
张伯明　张冶文　张启平　张　波　张　亮　张洪钟　张祖平　张勇传　张晓江　张晓锋
张　敏　张　望　张景洲　陆永平　陆宠惠　陆俭国　陆剑秋　陆祖良　陆家榆　陆嘉明
陈汉民　陈伟根　陈　仲　陈众励　陈庆国　陈　坚　陈伯时　陈国柱　陈治明　陈建飚
陈　星　陈思锜　陈　勇　陈哲艮　陈恩鉴　陈雪梅　陈清泉　陈超志　陈敬超　陈辉明
陈黎平　陈德昌　陈德胜　陈德桂　邵　岚　苟锐锋　林云生　林公舒　林集明　易学勤
罗永浩　罗景华　金如麟　周小谦　周以国　周双喜　周　平　周仲仁　周远翔　周孝信
周建中　周思刚　周家启　周锡生　郑小康　郑云之　郑永红　郑克文　郑明光　宗建华
宓传龙　孟庆东　赵玉文　赵光宙　赵　伟　赵红一　赵昌宗　赵治华　赵宗让　赵荣祥
赵相宾　赵　洁　赵　敏　赵婉君　赵　琨　赵　毅　赵黛青　荣命哲　胡方荪　胡　安

胡学浩　胡振岭　胡鉴清　段善旭　段献忠　侯子良　俞忠德　俞智斌　饶芳权　施　国
施鹏飞　洪元颐　姚本荣　姚尔昶　姚家祎　姚福生　贺建华　贺益康　贺湘琨　贺德馨
骆仲泱　秦　和　秦裕碧　袁余军　袁建生　袁建敏　都兴有　耿英三　莫会成　贾东旭
夏　立　夏祥贵　顾四行　顾国彪　钱昌燕　钱宝良　钱照明　倪维斗　徐元辉　徐凤刚
徐永法　徐兆丰　徐国政　徐洪海　徐殿国　徐　铱　徐德鸿　殷禄祺　高子瑜　高文胜
高庆国　高京生　高理迎　高培庆　郭天兴　郭国顺　郭保良　郭　洁　郭振岩　郭　灏
唐任远　唐　炬　唐春潮　陶星明　黄少锋　黄仁乐　黄妙庆　黄其励　黄国治　黄学清
黄宝生　黄晓丽　黄崇祺　黄景湖　梅生伟　曹一家　曹惠彬　戚庆成　崔志强　崔　翔
康　勇　章名耀　章定邦　梁维宏　梁维燕　梁曦东　彭宗仁　葛大麟　葛少云　葛诗慧
葛蓉生　葛溪亭　葛增茂　董卫国　蒋洪德　蒋善定　韩民晓　韩英铎　惠世恩　覃大清
程天麟　程均培　程时杰　程树康　程浩忠　傅书逿　焦　侬　焦树建　舒惠芬　曾文星
曾正中　曾明富　曾南超　曾雁鸿　曾　嵘　游亚戈　谢开贵　谢秋野　雷银照　雷清泉
满慧文　蔡崇积　管瑞良　廖胜松　廖瑞金　缪鸿兴　黎晓晖　颜渝坪　薛以太　戴先中
戴庆忠　戴慧珠　魏光辉

序

电气工程包括发电工程、输配电工程和用电工程，是为国民经济发展提供电力能源及其装备的战略性产业，是国家工业化和国防现代化的重要技术支撑，是国家在世界经济发展中保持自主地位的关键产业之一。电气工程的产业关联度高，对从原材料工业、机械制造业、装备工业以及电子、信息等一系列产业的发展均具有推动和带动作用，对提高整个国民经济效益，促进经济社会可持续发展，提高人民生活质量有显著影响。

经过改革开放30年来的发展，我国电气工程已经形成了较完整的科研、设计、制造、建设、运行体系，成为世界电力工业大国之一。至2007年底，我国发电装机容量达7.13亿kW，三峡水电及输变电工程、百万千瓦级超超临界火电工程、百万千瓦级核电工程，以及正在建设的交流1000kV、直流±800kV特高压输变电工程等举世瞩目；大电网安全稳定控制技术、新型输电技术的推广，大容量电力电子技术的研究和应用，风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源发电技术的产业化及规模化应用，超导电工技术、脉冲功率技术、各类电工新材料的探索与应用取得重要进展。特别是进入21世纪以来，电气工程领域全面贯彻科学发展观，新原理、新技术、新产品、新工艺获得广泛应用，拥有了一批具有自主知识产权的科技成果和产品，自主创新已成为行业的主旋律。我们的电气工程技术和产品，在满足国内市场需求的基础上已经开始走向世界。

电气工程技术的快速发展和巨大成就，要求对原有知识的不断更新，广大电气工程领域的工作者们对新的知识愈加渴求。在原机械工业部陆燕荪、电力工业部陆延昌两位老部长的倡议和领导下，由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个全国性学会，联合组织了电气工程各领域近2000位专家和学者，历

时4年多，编撰的《中国电气工程大典》现在出版了。这套内容新颖实用的巨著是电气工程领域一项重要的基础性工作，也是我国电气工程技术人员对社会的一项公益性奉献。这部鸿篇巨著不仅具有电气工程技术的知识魅力，同时也具有鲜明的时代特色，相信会为广大读者营造一个开卷有益的氛围。

电能作为目前使用最方便的二次能源，在推动社会进步、促进科学技术发展和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。随着社会的不断进步和人民生活水平的不断提高，电气工程任重而道远，需要依靠科技进步，并用更新的科学知识武装每一位电气工作者，所以，希望这套著作能对电气工程的教学、科研、设计和管理人员有所裨益。

徐匡迪

二〇〇八年八月十二日

前　言

电的产生和应用是人类有史以来最伟大的科学技术成就之一。电力作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，在推动社会发展、促进科学技术进步和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。一个多世纪以来，电气技术的不断发展，电力生产及应用的日益增长，迅速改变了人类社会的面貌，也深深影响着人们的生活方式。电气化的程度已成为国家文明程度的重要标志之一。

改革开放30年来，我国科学技术取得了突飞猛进的发展，科技创新已成为国家发展的重要战略。在电气工程领域，新原理、新技术、新工艺、新材料得到了广泛应用，涌现出一大批具有自主知识产权的科研成果和产品。三峡电站的建设，大容量高效清洁超临界和超超临界压力机组的迅速发展，特高压交直流输电技术和灵活交流输电技术的发展和应用，先进的核能发电厂及可再生能源发电厂的成功建造，大电网智能化动态稳定监控系统和信息管理系统的广泛应用，具有先进水平的电气装备制造业的高速发展，大容量电能变换与节能节电技术，风力发电、太阳能光伏发电等资源节约、环境友好的新技术的大量应用，计算机和信息网络技术在电气领域的普及，明显改变着电气工程领域技术发展状况。超导电工技术、脉冲功率技术，纳米材料、永磁材料、有机硅材料等各类电工新技术和新材料的探索与应用，都充分展示了中国电气工程领域所取得的骄人业绩，引起了世界的高度关注。其中许多科研成果和产品，已达到国际先进水平。

电气工程从业人员多，涉及面广，技术进步快，科研成果多，许多科研成果需要总结和积累，许多新的知识需要普及和传播。盛世修典，素有遗风。为反映电气工程领域最新的发展成就，总结已有的科研成果，传播工程领域最新的科学技术知识，中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个学会，联合组织了电气工程各领域的约2000位专家和学者，编撰了《中国电气工程大典》。

本套书的编写工作于2004年开始启动，编委会多次召开工作会议，精心组织，按照“取材突出新原理、新技术、新工艺、新材料；内容体现新颖性、先进性、实用性；表达力求简明扼要、深入浅出、直观易懂”的原则，反复讨论并修改编写大纲，确定编写内容。经过4年磨砺，数易其稿，终于付梓出版。《中国电气工程大典》共15卷约5000万字，包括《现代电气工程基础》、《电力电子技术》、《电气工程材料及器件》、《火力发电工程》、《水力发电工程》、《核能发电工程》、《可再生能源发电工程》、《电力系统工程》、《电机工程》、《输变电工程》、《配电工程》、《船舶电气工程》、《交通电气工程》、《建筑电气工程》和《电气传动自动化》。

所有组织者和编著者都把编撰本套书当作电气工程领域建设的一项重要的基础性工作，他们认真负责，辛勤耕耘，倾注了大量心血。本套书在编写出版过程中，得到参与编写的各科研院所、企业、高等院校等单位的大力支持，还得到业内有关院士和专家、学者的热心帮助。正是大家的积极参与和无私奉献，才使得这部大典能顺利编写出版，编委会对他们的奉献和支持表示衷心感谢。

这部鸿篇巨著，涉及电气工程设计制造、建设施工、生产运行、科研教学、工程管理等领域，总结了改革开放30年来电气工程各领域的技术发展与成功经验，展示了各专业领域的最新技术数据、设计经验、科技成果和发展动态，汇集了国内外相关的先进理念和成熟经验，体现了科学性、先进性和实用性的结合，是一套可供电气工程领域专业技术人员和管理人员使用的综合性工具书，也可供高等院校相关专业师生参考。

《中国电气工程大典》的编撰出版工作涉及面广，参与人员多，写作难度大。尽管编撰人员尽心尽力，倾注了无数心血，但书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者指正。

中国电气工程大典编辑委员会主任

陆燕荪 陆延昌

中国电气工程大典卷目

卷　目	篇　目
第1卷 现代电气工程基础	1. 电磁场基础　2. 电路与电网络分析基础　3. 电磁兼容基础　4. 现代电磁测量技术基础　5. 电工材料基础　6. 高电压技术基础　7. 脉冲功率技术基础　8. 电气安全技术基础　9. 电工新技术　10. 电工标准与合格评定，电工计量
第2卷 电力电子技术	1. 概论　2. 电力电子器件　3. 电力电子器件应用基础　4. 基本电力电子电路　5. 电力电子控制技术　6. 电力电子软开关技术　7. 电力电子多电平技术　8. 电源技术　9. 电力电子系统中的磁技术　10. 电力电子技术在电力传动中的应用　11. 电力系统中的电力电子装置　12. 电力电子电路/系统建模及计算机仿真　13. 电力电子电路/系统电磁兼容设计　14. 电力电子系统集成
第3卷 电气工程材料及器件	1. 绝缘材料　2. 磁性材料　3. 导体材料及其制品　4. 电气功能材料　5. 电线电缆　6. 电池
第4卷 火力发电工程 （上、下）	1. 概论　2. 火力发电厂设计　3. 锅炉　4. 汽轮机　5. 汽轮发电机　6. 自动控制系统　7. 电站系统与辅机设备　8. 超临界、超超临界机组　9. 大型循环流化床锅炉　10. 大型空冷机组　11. 热电联产机组　12. 燃气轮机及联合循环机组　13. 燃煤的燃气—蒸汽联合循环机组　14. 内燃机电站　15. 电站环保技术　16. 火力发电厂运行
第5卷 水力发电工程	1. 水力发电工程通论　2. 水轮机　3. 水轮发电机　4. 电气主接线和电气设备　5. 水电站自动控制综合系统与装置　6. 水电站运行　7. 抽水蓄能电站
第6卷 核能发电工程	1. 概论　2. 压水堆核电厂　3. 核电厂的建造　4. 核电厂的调试及营运　5. 先进压水堆核电厂　6. 下一代先进核能系统
第7卷 可再生能源发电工程	1. 概论　2. 太阳能光伏发电技术　3. 太阳热发电　4. 风力发电　5. 生物质能发电　6. 海洋能发电　7. 地热发电

卷　目	篇　目
第8卷 电力系统工程	1. 电力系统规划　2. 远距离大容量交流输电系统　3. 高压直流输电系统　4. 灵活交流输电系统　5. 电力系统互联　6. 电力市场　7. 电力系统可靠性　8. 电力系统分析与仿真　9. 电力系统有功功率调整和频率控制　10. 电力系统无功补偿和电压控制　11. 电力系统稳定性及稳定控制　12. 电力系统控制理论与方法　13. 电力系统调度及调度自动化　14. 电力系统继电保护和安全自动装置　15. 电能质量　16. 配电系统及其自动化　17. 电力系统通信　18. 电力信息系统　19. 超导电力技术　20. 分布式能源电力系统
第9卷 电机工程	1. 电机通论　2. 同步电机　3. 感应电机　4. 直流电机　5. 特种电机
第10卷 输变电工程	1. 输电系统　2. 变电系统　3. 变压器、电抗器、互感器、电容器和调压器　4. 高压开关设备　5. 绝缘子和避雷器　6. 直流输电设备　7. 特高压输电技术　8. 输变电系统过电压与绝缘配合　9. 输变电系统的电磁环境　10. 高电压试验设备与电气绝缘试验　11. 设备状态在线监测与故障诊断技术
第11卷 配电工程	1. 概论　2. 低压电器　3. 低压成套开关设备和控制设备　4. 低压电器与成套设备可靠性技术　5. 低压电器试验与检测技术　6. 低压成套开关设备和控制设备试验与检测技术
第12卷 船舶电气工程	1. 概论　2. 船舶电机与电器　3. 船舶电站　4. 船舶电力系统　5. 船舶电力推进　6. 船舶机械电气控制　7. 综合船桥系统　8. 船舶电磁防护技术　9. 船舶电磁兼容　10. 船舶电气工艺
第13卷 交通电气工程	1. 汽车电气　2. 轨道交通电气
第14卷 建筑电气工程	1. 概论　2. 建筑电气的规范及标准　3. 建筑电气装置标准　4. 建筑中低压配电系统工程　5. 低压供配电系统　6. 建筑工程常用电器系统　7. 建筑照明　8. 建筑电气消防系统　9. 建筑设备监控系统　10. 安全防范系统与工程　11. 通信网络及信息系统　12. 防雷与接地　13. 建筑物电磁兼容技术
第15卷 电气传动自动化	1. 概论　2. 电气自动控制策略　3. 计算机控制技术　4. 电气传动控制系统　5. 装备制造电气自动化　6. 电气传动自动化的应用

目　录

序
前言
第1篇　电机通论 …… 1
第1章　概论 …… 3
1　电机的基本工作原理 …… 3
2　电机的分类及应用 …… 3
3　电机的基本技术要求 …… 4
3.1　运行条件 …… 4
3.2　工作制和定额 …… 5
4　电机的发展趋势 …… 6
第2章　电机设计及分析基础 …… 7
1　设计技术要求 …… 7
1.1　设计依据 …… 7
1.2　设计基本内容 …… 8
2　电机的主要尺寸 …… 8
2.1　利用系数及电磁负荷 …… 8
2.2　主要尺寸比 …… 8
2.3　气隙 …… 8
3　绕组 …… 9
3.1　绕组概述 …… 9
3.2　交流绕组 …… 9
3.3　直流电枢绕组 …… 11
3.4　短路绕组 …… 11
3.5　磁极绕组 …… 12
4　气隙磁场及磁路 …… 12
4.1　交流绕组磁动势 …… 12
4.2　空载气隙磁场 …… 12
4.3　磁路计算 …… 13
4.4　励磁磁动势与励磁电流 …… 15
5　电感与电抗 …… 15
5.1　主电抗 …… 15
5.2　漏磁通与漏电抗 …… 15
5.3　电抗对电机运行性能的影响 …… 15
6　损耗与效率 …… 16
6.1　基本铁损耗 …… 16
6.2　绕组电阻损耗与电刷接触损耗 …… 16
6.3　杂散损耗 …… 16
6.4　风摩损耗 …… 16
6.5　效率 …… 16
7　结构安装型式和防护型式 …… 17
7.1　结构安装型式 …… 17
7.2　防护型式代号 …… 19
8　分析电机的理论和方法概述 …… 19
第3章　电机的现代设计方法 …… 21
1　电机设计和制造中计算机的应用 …… 21
1.1　概述 …… 21
1.2　电机计算机辅助设计的内容与发展简况 …… 21
1.3　CAD/CAM 在电机工程中的应用 …… 22
2　电机电磁场的数值计算方法 …… 22
2.1　边值问题和条件变分问题 …… 22
2.2　剖分插值 …… 23
2.3　条件变分问题离散化 …… 24
2.4　总体合成 …… 24
2.5　方程组的求解 …… 24
2.6　二维矢量位磁场的后续计算 …… 25
3　电机电磁场计算数值、解析结合法 …… 25
3.1　数值解析结合法气隙磁场模型 …… 26
3.2　两类方程的连接 …… 26
3.3　气隙磁场有关系数的计算 …… 27
3.4　磁场离散系数矩阵修改及其对称性 …… 27
3.5　转子的自由转动 …… 28
3.6　气隙磁场解析解的应用 …… 28
4　电机的计算机辅助设计和优化设计 …… 29
4.1　电机计算机辅助设计的一般过程与一些问题的处理方法 …… 30
4.2　电机的计算机辅助“校核设计” …… 31
4.3　电机的计算机辅助“综合设计” …… 34
4.4　电机 CAD 数据库与专家系统 …… 37
4.5　电机设计的最优化技术 …… 39
5　计算机辅助电机工程图的绘制 …… 42
5.1　计算机绘图基础 …… 42
5.2　电机图形的特点与编程技巧 …… 43
5.3　图库及其他 …… 45
第4章　电机结构 …… 47
1　固定部分 …… 47
1.1　定子机座 …… 47
1.2　定子铁心 …… 48
1.3　直流电机的主极和换向极铁心 …… 49
1.4　定子绕组 …… 49
1.5　主极线圈和换向极线圈 …… 50
2　转动部分 …… 50
2.1　转轴 …… 51
2.2　转子铁心 …… 52
2.3　转子绕组 …… 54
2.4　集电环和电刷 …… 56
2.5　换向器 …… 56
2.6　风扇 …… 56
3　辅助部分 …… 56
3.1　轴承 …… 56
3.2　电刷装置 …… 58
3.3　冷却器 …… 58
4　电机结构的机械设计基础 …… 58
4.1　概述 …… 58
4.2　金属材料的强度理论 …… 59
4.3　安全系数 …… 59
4.4　断裂力学概念 …… 60
4.5　常用应力集中系数 …… 60
5　主要零部件的常用机械算法 …… 60
5.1　机械设计常用计算公式 …… 60
5.2　固定部分机械设计计算 …… 61
5.3　电机轴的强度计算 …… 62
5.4　转子的临界转速 …… 62
5.5　转子的动平衡 …… 63

5.6 转子强度计算 …… 64
第5章 电机绝缘 …… 67
1 电机绝缘的基本性能 …… 67
1.1 介电性能 …… 67
1.2 耐热性能 …… 70
1.3 力学性能 …… 70
1.4 耐环境因素性能 …… 71
2 同步电机绝缘 …… 71
2.1 定子绕组绝缘结构 …… 71
2.2 转子绕组绝缘结构 …… 75
2.3 定子线圈和绕组绝缘工艺 …… 78
2.4 转子线圈和绕组绝缘工艺 …… 79
3 感应电机绝缘 …… 80
3.1 感应电机定子绝缘结构 …… 80
3.2 转子绕组绝缘结构 …… 83
3.3 定子线圈和绕组绝缘工艺 …… 83
3.4 转子线圈和绕组绝缘工艺 …… 83
4 直流电机绝缘 …… 84
4.1 电枢线圈和绕组绝缘结构 …… 84
4.2 换向器绝缘结构 …… 84
4.3 主极绝缘结构 …… 84
4.4 换向极绝缘结构 …… 85
4.5 补偿线圈绝缘结构 …… 85
4.6 直流电机绝缘工艺 …… 85
5 低压电机绝缘 …… 85
5.1 定子绕组绝缘结构 …… 85
5.2 转子绕组绝缘结构 …… 86
5.3 低压电机绝缘工艺 …… 86
6 电机绝缘试验 …… 88
6.1 股间短路检查试验 …… 88
6.2 定子线圈匝间耐冲击电压试验 …… 88
6.3 磁极线圈和磁极绕组匝间绝缘试验 …… 89
6.4 定子线圈和绕组对地绝缘工频交流耐电压试验 …… 89
6.5 定子绕组的直流耐电压试验及泄漏电流测量 …… 91
6.6 同步电机磁场绕组对地绝缘耐电压试验 …… 91
6.7 绝缘电阻及极化指数测量 …… 91
6.8 其他电机绕组绝缘性能试验 …… 92
第6章 电机的发热与冷却 …… 93
1 概述 …… 93
2 电机的发热 …… 93
2.1 电机损耗的分类 …… 93
2.2 电机中各种损耗的分布 …… 93
3 电机发热的影响 …… 93
3.1 电机发热对绝缘寿命的影响 …… 93
3.2 电机发热对某些金属材料性能的影响 …… 93
4 电机的温升 …… 94
4.1 温升 …… 94
4.2 我国电机温升限值标准 …… 94
4.3 影响电机温升的因素 …… 94
5 电机的散热与冷却 …… 94
5.1 电机的散热 …… 94
5.2 电机的冷却介质 …… 97
5.3 电机的冷却方式及其选用 …… 98
5.4 电机的通风系统 …… 98
5.5 蒸发冷却及其在电机中的应用 …… 101
6 电机的综合热计算 …… 104
6.1 等效热路法 …… 104
6.2 二维稳定导热的数值解法 …… 105
6.3 水轮发电机温度场计算 …… 105
7 风扇及其选用 …… 106
7.1 轴流式风扇 …… 107
7.2 离心式风扇 …… 107
8 冷却器及其选用 …… 107
8.1 冷却器中流体的流动方式 …… 107
8.2 气体-水冷却器 …… 107
8.3 气体-气体冷却器 …… 108
8.4 冷却器的选用 …… 108
9 相似方法在电机通风系统研究中的应用 …… 109
9.1 电机通风模型 …… 109
9.2 水模型 …… 110
10 电机发热与冷却的测量 …… 110
10.1 电机发热与冷却测试内容 …… 110
10.2 测试原理 …… 111
10.3 测试所用的试验仪器 …… 111
10.4 测试要求的试验工况 …… 111
第7章 电机振动、噪声与电磁兼容 …… 112
1 电机振动 …… 112
1.1 产生电机振动的主要因素 …… 112
1.2 电机振动限值 …… 112
1.3 电机振动测定方法 …… 113
2 电机噪声 …… 113
2.1 电机的主要噪声源及其产生机理 …… 113
2.2 电机噪声测定方法及噪声源识别 …… 114
2.3 电机噪声评定及噪声限值 …… 116
2.4 降低电机噪声的措施 …… 118
3 电机的电磁兼容性要求 …… 119
3.1 电磁兼容基本概念 …… 119
3.2 电磁兼容测量和试验标准 …… 119
3.3 骚扰的测量方法 …… 122
3.4 抗扰度试验方法 …… 123
3.5 提高产品 EMC 的方法 …… 123
第8章 电机试验 …… 124
1 概述 …… 124
1.1 试验种类 …… 124
1.2 试验电源 …… 124
1.3 测量仪器 …… 124
1.4 测量要求 …… 125
2 一般试验项目 …… 125
2.1 绝缘电阻的测定 …… 125
2.2 介电强度试验 …… 125
2.3 轴电压的测定 …… 126
2.4 超速试验 …… 126
2.5 转动惯量的测定 …… 126
2.6 振动和噪声的测定 …… 126
3 确定损耗和效率试验方法的通用要求 …… 127
3.1 效率 …… 127
3.2 损耗 …… 127
3.3 确定效率的试验方法 …… 127
3.4 被试电机的状态 …… 127
3.5 试验电阻的测定 …… 127

3.6 绕组温度的确定 …… 128
3.7 效率测量不确定度 …… 129
4 三相感应电动机确定损耗和效率的试验方法 …… 130
4.1 输入—输出法 …… 130
4.2 双电源对拖回馈法 …… 130
4.3 单电源对拖回馈法——适用于绕线转子感应电动机 …… 130
4.4 损耗分析法 …… 131
4.5 降低电压负载法 …… 134
4.6 等效电路法 …… 134
5 三相同步电机确定损耗和效率的试验方法 …… 135
5.1 输入—输出法 …… 135
5.2 总损耗测定法 …… 136
5.3 损耗分析法 …… 136
6 直流电机确定损耗和效率的试验方法 …… 137
6.1 输入—输出法 …… 137
6.2 总损耗测定法——单电源对拖回馈法 …… 137
6.3 损耗分析法 …… 138
7 变频器供电三相笼型感应电动机确定损耗和效率的试验方法 …… 139
7.1 测量仪表的要求 …… 139
7.2 输入—输出法确定效率 …… 139
7.3 损耗分析法——变频器供电空载和负载试验确定效率 …… 139
7.4 量热法确定效率 …… 139
8 间接法确定旋转电机温升 …… 140
8.1 三相感应电动机 …… 140
8.2 三相同步电机 …… 142
8.3 直流电机叠加法 …… 143
9 现代测试技术在交流电动机测试中的应用 …… 143
9.1 虚拟仪器测试系统 …… 143
9.2 总线技术在电动机测试系统中的应用 …… 144
9.3 网络化测试技术 …… 144
9.4 电动机测量 …… 145
第9章 电机的选用、运行节能和维护 …… 148
1 电机选用原则 …… 148
1.1 基本分类 …… 148
1.2 选用原则 …… 148
2 电机运行节能 …… 150
2.1 高效率三相感应电动机 …… 150
2.2 高效稀土永磁同步电动机 …… 150
2.3 调速节能 …… 150
3 电机的保护和维护 …… 151
3.1 电机的保护 …… 151
3.2 电机的维护 …… 152
3.3 电机常见故障的处理 …… 152
参考文献 …… 154

第2篇 同步电机 …… 155

第1章 概论 …… 157
1 同步电机特征 …… 157
2 同步电机的基本结构型式及分类 …… 157
2.1 基本结构型式 …… 157
2.2 分类 …… 157
3 同步电机用途 …… 158
4 同步电机发展趋势 …… 158
第2章 同步电机的基本原理 …… 160
1 稳态数学模型 …… 160
1.1 磁动势和电动势 …… 160
1.2 电枢反应磁动势的折算 …… 161
1.3 磁路饱和时的电动势方程 …… 161
1.4 电动机电动势方程 …… 162
2 电磁功率和稳定性 …… 162
2.1 电磁功率和电磁转矩 …… 162
2.2 静态稳定 …… 163
2.3 动态稳定概念 …… 163
3 运行 …… 164
3.1 发电机运行特性 …… 164
3.2 额定励磁电流的确定 …… 164
3.3 并网 …… 165
3.4 无功功率调节 …… 165
3.5 发电电动机的起动 …… 165
4 不对称运行 …… 166
4.1 对称分量法 …… 166
4.2 不对称稳态短路 …… 166
4.3 不对称负载的影响 …… 166
5 瞬态数学模型 …… 167
5.1 双轴理论 …… 167
5.2 派克方程 …… 168
5.3 运算电抗及其等效电路表述 …… 169
5.4 瞬态过程的电磁参数 …… 170
5.5 派克方程的应用 …… 170
5.6 状态方程概述 …… 170
5.7 异步运行 …… 171
6 各种突然短路过程的解析解 …… 171
6.1 三相突然短路 …… 171
6.2 两相突然短路 …… 172
6.3 单相对中性点突然短路 …… 172
6.4 突然短路的冲击电流和冲击转矩 …… 173
6.5 突然短路的负序电抗和时间常数 …… 173
7 振荡 …… 174
7.1 振荡转矩 …… 174
7.2 自由振荡和强制振荡 …… 174
7.3 定子电阻的影响 …… 175
8 特性参数 …… 175
9 电磁参数的数值计算 …… 176
9.1 运算电抗的计算方法 …… 176
9.2 直、交轴涡流场计算 …… 176
9.3 饱和工作点的确定 …… 176
9.4 参数辨识法 …… 177
10 机网瞬态过程的数值仿真 …… 177
10.1 机网协调问题的分析 …… 177
10.2 异步起动 …… 177
10.3 背靠背起动 …… 178
10.4 变频器起动 …… 179
10.5 误同期并网 …… 180
11 参数测试 …… 181
11.1 方法的选用 …… 182
11.2 测试方法 …… 183
第3章 透平发电机 …… 185
1 概述 …… 185

2 透平发电机设计 …… 185
2.1 设计依据 …… 185
2.2 系列设计、模块设计 …… 186
2.3 与拖动机械匹配 …… 186
2.4 冷却方式及其选用 …… 187
2.5 电磁设计 …… 187
2.6 机械设计 …… 188
2.7 热计算与温升限值 …… 188
3 发电机的结构 …… 189
3.1 基本结构 …… 189
3.2 空冷发电机 …… 194
3.3 氢冷发电机 …… 195
3.4 水内冷发电机 …… 197
3.5 核电用发电机 …… 198
3.6 燃气轮发电机 …… 199
4 关键材料 …… 200
5 励磁系统 …… 200
5.1 原理 …… 200
5.2 性能指标 …… 200
5.3 常用励磁系统 …… 201
6 大型透平发电机的几个特殊问题 …… 202
6.1 进相运行 …… 202
6.2 调峰措施 …… 202
6.3 不平衡负荷承载能力 …… 202
6.4 定子运输问题 …… 203
7 安装与维护 …… 203
7.1 安装前检查 …… 203
7.2 定子安装 …… 203
7.3 转子安装 …… 203
7.4 轴承及油密封安装 …… 203
7.5 维修检查 …… 204
8 试验 …… 204
8.1 型式试验和出厂检查试验 …… 204
8.2 交接试验 …… 205
8.3 考核试验 …… 205
8.4 科研试验 …… 205
9 发电机运行 …… 206
9.1 起动前检查项目和要求 …… 206
9.2 发电机组起动 …… 206
9.3 发电机组调试 …… 207
9.4 并网 …… 207
9.5 机组综合试运行 …… 207
9.6 整套机组试运行结束 …… 207
9.7 发电机组交付运行 …… 207
9.8 正常运行方式及规定 …… 207
9.9 发电机保护 …… 209
9.10 运行监测和注意事项 …… 209
9.11 偏离允许值时应采取的措施 …… 210
10 网机关系及协调 …… 211
10.1 非正常运行工况设计和应用导则 …… 211
10.2 系统扰动后检查 …… 212
10.3 协调网机关系 …… 212
11 发电机故障诊断 …… 213
11.1 在线监测 …… 213
11.2 故障诊断 …… 214
11.3 提高可靠性对策 …… 221
第4章 水轮发电机 …… 222
1 分类及型号 …… 222
1.1 分类 …… 222
1.2 型号 …… 223
2 主要技术数据 …… 224
2.1 额定容量和额定功率 …… 224
2.2 最大容量 …… 224
2.3 额定电压 …… 224
2.4 额定功率因数 …… 224
2.5 额定转速 …… 224
2.6 飞逸转速 …… 225
2.7 飞轮力矩 …… 225
2.8 机械时间常数与储能常数 …… 225
2.9 短路比 …… 225
2.10 直轴瞬态电抗 …… 225
2.11 槽电流和定子绕组并联支路数 …… 227
2.12 电负荷和热负荷 …… 227
2.13 磁负荷 …… 232
2.14 铁心和绕组温升 …… 232
2.15 效率与损耗 …… 232
2.16 调相容量及充电容量 …… 233
3 设计计算 …… 233
3.1 空载电压波形计算 …… 233
3.2 定子绕组次谐波振动计算 …… 234
3.3 定子线棒特殊换位选择计算 …… 234
3.4 阻尼绕组计算 …… 234
3.5 定子端部电动力计算 …… 235
3.6 定子短路电流计算 …… 235
3.7 发电机误同期并网计算 …… 235
3.8 主要结构部件刚、强度及固有频率计算 …… 235
3.9 防止定子铁心热胀变形计算 …… 236
3.10 机组轴系稳定性计算 …… 236
3.11 薄壳结构稳定性计算 …… 236
3.12 发电电动机过转矩计算 …… 236
3.13 发电电动机起动特性计算 …… 236
3.14 发电电动机工况转换计算 …… 236
4 安装结构型式选择 …… 237
4.1 卧式 …… 237
4.2 悬式和伞式 …… 237
5 水轮发电机结构 …… 237
5.1 定子 …… 237
5.2 转子 …… 241
5.3 机架 …… 249
5.4 推力轴承 …… 252
5.5 导轴承 …… 262
5.6 制动装置 …… 265
5.7 空气冷却器 …… 266
5.8 灭火系统 …… 268
5.9 中性点接地装置 …… 269
6 通风冷却系统 …… 270
6.1 冷却方式分类、特点及适用范围 …… 270
6.2 通风系统 …… 271
6.3 定子绕组水直接冷却 …… 272
6.4 定子绕组蒸发冷却 …… 273
7 灯泡式水轮发电机 …… 274
7.1 电磁设计 …… 274

7.2 结构及主要尺寸选择 …… 275
7.3 通风冷却系统 …… 282
8 发电电动机 …… 284
8.1 设计特点 …… 284
8.2 推力轴承 …… 284
8.3 通风冷却系统 …… 284
8.4 起动与工况转换 …… 284
8.5 交流调速发电电动机 …… 284
9 振动 …… 285
9.1 振动原因及条件 …… 285
9.2 振动标准 …… 285
10 安装 …… 287
10.1 一般安装程序 …… 287
10.2 定子装配 …… 288
10.3 转子装配 …… 289
10.4 上、下机架装配 …… 289
10.5 发电机总装 …… 289
11 试验 …… 290
11.1 试验标准 …… 291
11.2 试验项目 …… 291
12 附属设备 …… 293
12.1 油水管路 …… 293
12.2 照明 …… 293
12.3 电缆 …… 293
12.4 测温电阻 …… 293
12.5 端子箱 …… 293
12.6 电加热器 …… 294
12.7 除湿机 …… 294
12.8 粉尘收集装置 …… 294
12.9 炭粉吸收装置 …… 294
第5章 柴油发电机 …… 295
1 概述 …… 295
1.1 发电机与柴油机的功率匹配 …… 295
1.2 励磁系统特点 …… 295
1.3 结构防护型式与安装型式 …… 295
1.4 主要技术性能 …… 295
2 设计要点 …… 296
2.1 定子绕组 …… 296
2.2 斜槽 …… 296
2.3 凸极与隐极转子 …… 296
2.4 通风与冷却 …… 297
2.5 轴的扭振 …… 297
3 机组运行 …… 297
3.1 单机运行 …… 297
3.2 并联运行 …… 297
3.3 柴油发电机运行中的主要故障及其原因和处理方法 …… 298
4 特殊试验 …… 298
第6章 同步电动机和同步调相机 …… 299
1 同步电动机 …… 299
1.1 特点和用途 …… 299
1.2 结构 …… 299
1.3 起动 …… 299
1.4 配往复式压缩机时飞轮力矩的选择 …… 301
1.5 同步异步电动机 …… 301
2 无换向器电动机 …… 301
2.1 工作原理与调速控制 …… 302
2.2 变频调速同步电动机特点 …… 302
2.3 变频调速同步电动机结构 …… 303
3 同步调相机 …… 308
3.1 特点和用途 …… 308
3.2 结构 …… 308
3.3 起动方法 …… 308
第7章 其他类型同步电机 …… 309
1 中频发电机 …… 309
1.1 爪极发电机 …… 309
1.2 感应子发电机 …… 309
2 永磁同步电机 …… 311
3 交流励磁发电机 …… 311
4 短路发电机 …… 312
5 正弦波发电机 …… 312
6 小功率同步电动机 …… 313
第8章 同步电机励磁系统 …… 314
1 概述 …… 314
1.1 常用励磁系统 …… 314
1.2 常用励磁系统的应用 …… 314
1.3 “高起始”的概念 …… 315
2 励磁调节器 …… 315
2.1 自动电压调节器 …… 315
2.2 “手动”调节器 …… 317
3 励磁系统的功率装置 …… 317
3.1 交流励磁机励磁系统的功率装置 …… 317
3.2 静止励磁系统的功率装置 …… 317
4 同步电机灭磁 …… 317
4.1 静止励磁系统的灭磁 …… 317
4.2 交流励磁机励磁系统的灭磁 …… 318
4.3 励磁回路的过电压保护 …… 318
第9章 异步化同步发电机 …… 319
1 概述 …… 319
2 异步化汽轮发电机数学模型及控制原理 …… 319
2.1 电气结构 …… 319
2.2 数学模型 …… 320
2.3 控制原理 …… 321
3 异步化汽轮发电机的运行特性 …… 321
3.1 双通道励磁控制 …… 321
3.2 有功和无功（电压）调节特性 …… 322
3.3 暂态特性 …… 323
4 异步化汽轮发电机电磁设计特点 …… 324
4.1 气隙的选取原则 …… 324
4.2 转子绕组的设计 …… 325
5 交流励磁同步发电机数学模型及控制原理 …… 326
5.1 电气结构及运行原理 …… 326
5.2 基本电磁关系与数学模型 …… 326
5.3 励磁控制原理 …… 328
6 交流励磁同步发电机运行特性 …… 328
6.1 发电机有功、无功调节特性 …… 328
6.2 暂态特性 …… 329
7 交流励磁同步发电机电磁设计 …… 329
7.1 运行方式 …… 329
7.2 电磁设计特点 …… 330
7.3 电磁计算程序 …… 330
参考文献 …… 332

第3篇 感应电机 …… 333

第1章 概论 …… 335
1 感应电机的特征分类和用途 …… 335
1.1 基本特征 …… 335
1.2 主要类型和用途 …… 335
2 感应电机基本结构 …… 335
3 感应电动机的技术指标 …… 336
3.1 效率和功率因数 …… 336
3.2 起动性能分级 …… 336
3.3 噪声振动水平分析 …… 336
3.4 定子绕组温升限值 …… 336
4 感应电机产品发展概况及产品类别 …… 337
5 感应电机发展趋势 …… 338

第2章 感应电机工作原理 …… 339
1 气隙旋转磁场和感应电动势 …… 339
1.1 感应电机运行的基本原理 …… 339
1.2 磁动势与气隙磁场 …… 339
1.3 感应电动势 …… 340
1.4 转子物理量的折算 …… 340
1.5 基本方程组 …… 341
2 等效电路和相量图 …… 341
2.1 T形等效电路 …… 341
2.2 Γ形等效电路 …… 341
2.3 相量图 …… 342
3 能量转换 …… 342
3.1 功率损耗 …… 342
3.2 功率关系 …… 342
4 转矩特性 …… 342
4.1 转矩与功率的关系 …… 342
4.2 电磁转矩表达式 …… 342
4.3 转矩转差特性 …… 343
5 运行特性 …… 344
5.1 特性曲线 …… 344
5.2 运行特性与负载率的关系 …… 344
5.3 电压或频率偏差时对电机运行性能的影响 … 344
5.4 电压不对称时的运行 …… 345
6 谐波分析及谐波影响 …… 345
6.1 谐波分析 …… 345
6.2 附加转矩 …… 346
6.3 电磁振动力 …… 347
7 单相感应电机气隙磁场和转矩特性 …… 347
7.1 基本工作原理和气隙磁场 …… 347
7.2 等效电路与转矩特性 …… 347
7.3 起动方法和单相电容电动机 …… 348

第3章 三相感应电动机设计 …… 350
1 主要尺寸的确定 …… 350
1.1 利用系数 …… 350
1.2 电磁负荷 …… 350
2 冲片和铁心设计 …… 350
2.1 定子冲片外径和内径 …… 350
2.2 铁心有效长度与极距之比 …… 350
2.3 气隙长度 …… 350
2.4 槽数选择和槽配合 …… 351
2.5 槽形选择和槽形尺寸的确定 …… 351
3 绕组设计 …… 351
3.1 绕组型式的选用 …… 351
3.2 绕组联结 …… 351
3.3 绕组节距 …… 351
3.4 绕组并联支路数和每槽导体数 …… 351
3.5 导线规格 …… 352
3.6 槽满率 …… 352
4 运行性能计算 …… 352
4.1 磁路计算 …… 352
4.2 参数计算 …… 352
4.3 性能计算 …… 353
5 起动性能计算 …… 353
5.1 饱和效应计算 …… 353
5.2 集肤效应计算 …… 354
5.3 起动电流和起动转矩的计算 …… 354
5.4 起动时间计算 …… 355
5.5 起动温升计算 …… 355
6 通风温升计算 …… 355
6.1 感应电机常用的通风系统和温升计算方法 … 355
6.2 机壳表面冷却电机的通风计算 …… 356
6.3 机壳表面冷却电机的温升计算 …… 356
6.4 内通风系统电机的通风计算 …… 356
6.5 内通风系统电机的温度场计算 …… 357
7 噪声计算 …… 357
7.1 电磁噪声计算 …… 358
7.2 轴承噪声 …… 359
7.3 通风噪声 …… 359
8 结构设计 …… 359
8.1 机座 …… 360
8.2 定子铁心 …… 360
8.3 定子绕组 …… 360
8.4 转子铁心和绕组 …… 361
8.5 转轴 …… 362
8.6 轴承结构 …… 362
8.7 转子平衡 …… 362
9 计算机辅助设计 …… 363
9.1 计算机辅助设计系统 …… 363
9.2 计算机辅助电磁设计 …… 363
9.3 计算机绘制电机零部件图 …… 364

第4章 感应电动机的起动、制动和调速 …… 365
1 感应电动机的起动方法 …… 365
1.1 笼型电动机的起动方法 …… 365
1.2 绕线转子感应电动机的起动方法 …… 366
2 感应电动机的电磁制动方法 …… 366
2.1 回馈制动 …… 366
2.2 反接制动 …… 367
2.3 能耗制动 …… 367
3 感应电动机的调速方法 …… 367
3.1 变极调速 …… 367
3.2 变频调速 …… 367
3.3 绕线转子感应电动机调速 …… 368

第5章 一般用途三相感应电动机 …… 369
1 低压三相感应电动机 …… 369
1.1 Y系列电动机 …… 369
1.2 Y2系列电动机 …… 371
1.3 Y3系列电动机 …… 371
2 高压三相感应电动机 …… 372

2.1 防护式高压三相感应电动机 …… 372
2.2 带冷却器封闭式高压三相感应电动机 …… 374
2.3 全封闭外扇冷感应电动机 …… 376
第6章 感应电动机节能及高效电机 …… 378
1 电动机节能的意义和潜力 …… 378
2 高效电机及电动机能效标准 …… 378
2.1 高效电机 …… 378
2.2 电动机能效标准 …… 378
3 提高电动机效率的措施 …… 380
3.1 增加有效材料降低绕组损耗和铁损耗 …… 380
3.2 采用较好的磁性材料和工艺措施以降低铁损耗 …… 381
3.3 缩小风扇降低通风损耗 …… 381
3.4 通过设计和工艺措施降低杂散损耗 …… 381
3.5 改进压铸工艺降低转子损耗 …… 381
3.6 应用计算机优化设计降低损耗提高效益 …… 381
第7章 感应电动机变频调速及双馈调速 …… 382
1 变频调速控制方式 …… 382
1.1 额定频率以下的电压控制方式 …… 382
1.2 额定频率以上的电压控制方式 …… 382
1.3 控制特性 $U_1 = f(f_1)$ …… 382
2 变频调速电动机特性 …… 382
2.1 感应电动机固有的机械特性 …… 382
2.2 恒压频比控制时的机械特性 …… 383
2.3 恒气隙磁通控制时的机械特性 …… 383
2.4 恒转子全磁通控制时的机械特性 …… 383
2.5 额定频率以上恒电压控制时的机械特性 …… 383
3 变频调速感应电动机电磁设计特点 …… 384
3.1 变频调速感应电动机的主要问题 …… 384
3.2 变频感应电动机的设计特点 …… 384
3.3 变频感应电动机设计方法 …… 385
4 双馈感应电动机调速 …… 386
4.1 调速原理 …… 386
4.2 功率关系 …… 387
4.3 磁场定向矢量控制 …… 387
第8章 多速三相感应电动机 …… 388
1 基本原理和方法 …… 388
1.1 基本原理 …… 388
1.2 槽号相位图 …… 388
2 反向法变极绕组 …… 389
2.1 接线方法 …… 389
2.2 反向法变极步骤 …… 389
2.3 变前极为正规接法绕组的反向法变极 …… 389
2.4 倍极比反向法变极绕组 …… 390
2.5 非正规接法绕组的反向法变极 …… 391
3 换相法变极绕组 …… 392
3.1 变前极和变后极都是60°相带绕组 …… 392
3.2 变前极和变后极绕组都是120°相带绕组 …… 392
3.3 60°相带变90°相带换相变极法 …… 393
4 三速及四速变极绕组 …… 394
4.1 三速变极绕组 …… 394
4.2 四速变极绕组 …… 396
5 单绕组多速三相感应电动机设计特点 …… 396
5.1 电磁转矩比和电磁功率比 …… 396
5.2 绕组磁动势的分析 …… 397
5.3 轭部磁路及损耗计算 …… 399
5.4 参数计算 …… 399
第9章 防爆感应电动机 …… 400
1 防爆电机遵循的防爆标准 …… 400
2 防爆电机的防爆型式、类别和温度组别 …… 400
3 防爆电机的防爆通用要求 …… 400
3.1 风扇风罩 …… 400
3.2 接地 …… 401
3.3 连接件和接线盒 …… 401
3.4 电缆和导管引入装置 …… 401
4 隔爆型电机的设计和结构特点 …… 401
4.1 隔爆外壳的强度和材质 …… 401
4.2 电缆和导线的引入和连接 …… 401
4.3 紧固件 …… 402
4.4 隔爆接合面型式及结构参数 …… 402
4.5 隔爆接合面的处理 …… 402
5 增安型电机的设计和结构特点 …… 402
5.1 内部导线连接 …… 402
5.2 电气间隙和爬电距离 …… 402
5.3 绕组 …… 403
5.4 极限温度 …… 403
5.5 外壳防护等级 …… 403
5.6 最小径向单边间隙 …… 403
5.7 笼型转子电动机 …… 403
5.8 t_E 时间和起动电流比 I_A/I_N …… 403
6 “n”型电机的设计和结构特点 …… 403
7 正压外壳型电机的设计和结构特点 …… 404
8 防爆电机的选型 …… 405
9 防爆电机主要产品介绍 …… 405
第10章 起重及冶金用三相感应电动机 …… 407
1 起重及冶金用三相感应电动机的特性及用途 …… 407
1.1 特性 …… 407
1.2 用途 …… 407
2 起重及冶金用三相感应电动机的设计及结构特点 …… 407
3 起重及冶金用三相感应电动机的主要产品 …… 407
3.1 起重及冶金用三相感应电动机产品分类 …… 407
3.2 起重及冶金用三相感应电动机主要产品及特征 …… 407
4 起重及冶金用三相感应电动机产品选型 …… 411
4.1 S1～S5工作制的发热问题 …… 411
4.2 工作周期 $t_s \neq 10$min 时电动机的发热 …… 411
4.3 S4及S5工作制电动机功率的确定 …… 411
第11章 潜水及潜油感应电动机 …… 413
1 潜水电动机与潜水电泵概述 …… 413
2 潜水电动机的典型结构 …… 413
2.1 充水式结构 …… 413
2.2 充油式结构 …… 414
2.3 屏蔽式结构 …… 414
2.4 干式结构 …… 414
3 主要零部件的结构和材料 …… 415
3.1 定子绕组 …… 415
3.2 接头密封 …… 415
3.3 轴伸端密封 …… 415
3.4 轴承 …… 415
3.5 保压机构和贫油保护信号装置 …… 416

4 井用潜水感应电动机 …… 416
5 小型潜水电泵 …… 417
5.1 充油式潜水电泵 …… 417
5.2 充水式潜水电泵 …… 417
5.3 干式潜水电泵 …… 417
5.4 主要规格和参数 …… 417
6 污水污物潜水电泵 …… 418
6.1 污水用与颗粒污物用潜水电泵 …… 418
6.2 纤维污物用潜水电泵 …… 419
6.3 主要规格和参数 …… 419
7 潜水螺杆泵 …… 419
8 矿用潜水电泵 …… 419
9 轴流潜水电泵 …… 419
9.1 贯流式轴流潜水电泵 …… 419
9.2 灯泡式轴流潜水电泵 …… 419
9.3 主要规格和参数 …… 420
10 大型潜水电泵 …… 420
10.1 结构与主要特点 …… 420
10.2 主要规格和参数 …… 420
11 潜水电泵的选择与使用 …… 420
11.1 潜水电泵的选用 …… 420
11.2 潜水电泵的使用与维护 …… 421
12 井用潜油感应电动机 …… 421
12.1 结构特点与关键零部件 …… 421
12.2 主要规格和技术参数 …… 422
第 12 章 其他派生及专用三相感应电动机 …… 423
1 电磁调速感应电动机 …… 423
1.1 结构 …… 423
1.2 工作原理 …… 423
1.3 提高电动机性能的措施 …… 423
2 机械减速感应电动机 …… 423
2.1 齿轮减速感应电动机 …… 424
2.2 摆线针轮减速电动机 …… 424
3 自制动感应电动机 …… 424
3.1 电磁制动感应电动机 …… 424
3.2 锥形转子制动感应电动机 …… 425
3.3 盘式制动感应电动机 …… 425
4 高转差率感应电动机 …… 426
4.1 额定功率与工作制 …… 426
4.2 设计特点 …… 426
5 低振动低噪声感应电动机 …… 426
5.1 主要技术指标 …… 426
5.2 设计特点 …… 427
6 振动电动机 …… 427
6.1 用途及分类 …… 427
6.2 设计特点 …… 427
6.3 功能参数 …… 428
7 交流力矩电动机 …… 428
7.1 原理与特性 …… 428
7.2 设计特点 …… 429
7.3 力矩电机的应用 …… 429
7.4 主要技术参数 …… 430
8 电梯用感应电动机 …… 430
8.1 双速电梯用感应电动机 …… 430
8.2 调压调速电梯用感应电动机 …… 431
8.3 变频调速电梯用感应电动机 …… 432
8.4 电梯电机的发展方向 …… 432
9 实心转子感应电动机 …… 432
9.1 运行原理和应用 …… 432
9.2 设计特点 …… 433
9.3 提高电机性能的措施 …… 433
10 气候防护型电动机 …… 434
10.1 用途 …… 434
10.2 结构特点 …… 434
10.3 设计特点 …… 435
11 屏蔽感应电动机 …… 435
11.1 概述 …… 435
11.2 结构特点 …… 435
11.3 屏蔽套损耗与液体摩擦损耗 …… 435
11.4 特殊检查项目 …… 436
11.5 使用维护中的注意事项 …… 436
第 13 章 一般用途单相感应电动机及其设计要点 …… 437
1 概述 …… 437
1.1 单相感应电动机工作原理 …… 437
1.2 气隙谐波磁动势 …… 437
1.3 单相感应电动机产品特征分类及用途 …… 438
2 单相感应电动机的设计要点和主要参数 …… 440
2.1 一般单相感应电动机设计要点 …… 440
2.2 罩极电动机设计要点 …… 440
2.3 电磁负荷的选择 …… 440
2.4 主要尺寸的确定 …… 441
2.5 定子绕组的设计 …… 442
2.6 转子导条截面积及导条材料的选择 …… 443
3 起动开关及电容器 …… 443
3.1 起动开关 …… 443
3.2 电容器 …… 446
4 热保护器 …… 447
4.1 概述 …… 447
4.2 热保护器的一般结构与工作原理 …… 447
4.3 热保护器的选用及注意事项 …… 447
第 14 章 规定用途和特殊用途单相感应电动机 …… 449
1 风扇电动机 …… 449
1.1 分类与技术要求 …… 449
1.2 结构与技术数据 …… 450
1.3 调速方法 …… 452
2 洗衣机电动机 …… 452
2.1 分类与技术要求 …… 452
2.2 结构与技术数据 …… 453
2.3 洗衣机及其电动机的交替换向旋转 …… 455
3 密封式制冷压缩机用电动机 …… 455
3.1 分类与技术要求 …… 455
3.2 结构与技术数据 …… 456
3.3 电动机的控制与保护 …… 457
4 泵用电动机 …… 457
4.1 分类与技术要求 …… 457
4.2 结构与技术数据 …… 458
5 离合器电动机 …… 459
5.1 分类与应用 …… 459
5.2 结构与技术数据 …… 459
6 空调器风扇电动机 …… 460
6.1 分类与技术要求 …… 460
6.2 结构与技术数据 …… 460

第15章　感应发电机 …… 462
1　感应发电机工作原理 …… 462
2　感应发电机等效电路与相量图 …… 462
3　感应发电机运行特性 …… 462
4　励磁电容量计算 …… 463
参考文献 …… 464

第4篇　直流电机 …… 465

第1章　概论 …… 467
1　特征、分类和用途 …… 467
1.1　特征 …… 467
1.2　分类 …… 467
1.3　用途 …… 467
2　主要技术数据 …… 467
3　结构 …… 468
4　直流电动机的质量 …… 468
5　发展趋势 …… 468
第2章　工作原理 …… 470
1　电枢电动势和电磁转矩 …… 470
1.1　电枢电动势 …… 470
1.2　电磁转矩 …… 470
2　电压、转矩和功率平衡 …… 470
3　电枢反应 …… 471
3.1　交轴电枢反应 …… 471
3.2　直轴电枢反应 …… 471
3.3　换向极和补偿绕组 …… 471
4　磁路 …… 471
4.1　主磁路 …… 472
4.2　换向极磁路 …… 472
5　电路 …… 472
5.1　电枢电路 …… 472
5.2　励磁电路 …… 473
第3章　运行特性 …… 474
1　直流发电机的运行特性 …… 474
1.1　主要工作特性 …… 474
1.2　固有电压调整率 …… 475
1.3　并励发电机的电压稳定 …… 475
1.4　电压调节 …… 475
1.5　电压脉动 …… 475
1.6　并列运行 …… 476
2　直流电动机的运行特性 …… 476
2.1　主要工作特性 …… 476
2.2　外特性的比较及应用 …… 477
2.3　固有转速调整率 …… 477
2.4　他励及并励电动机的稳定运行 …… 477
2.5　起动、调速和制动 …… 478
2.6　电动机的供电电源 …… 480
2.7　电动机的同轴运行 …… 480
3　直流电机的动态特性 …… 480
3.1　电动机机电时间常数 …… 480
3.2　励磁电路时间常数 …… 480
3.3　电枢电路时间常数 …… 481
3.4　电流变化率 …… 481
3.5　短路电流 …… 481
第4章　换向 …… 482
1　换向过程的基本概念 …… 482
1.1　换向元件中的电动势 …… 482
1.2　换向元件中的电流 …… 483
1.3　换向区 …… 483
1.4　片间电压 …… 483
2　换向计算 …… 484
2.1　数值计算 …… 484
2.2　工程计算 …… 485
3　改善换向的方法 …… 486
3.1　移刷 …… 486
3.2　换向极 …… 486
3.3　补偿绕组 …… 487
3.4　电刷与滑动接触 …… 487
3.5　叠片机座与电感分路 …… 487
3.6　其他 …… 488
4　换向火花 …… 488
4.1　火花等级 …… 488
4.2　火花评定 …… 488
4.3　无火花换向区 …… 488
5　环火 …… 489
5.1　产生环火的原因 …… 489
5.2　防止环火的措施 …… 489
第5章　电枢绕组 …… 490
1　电枢绕组的构成和参数 …… 490
1.1　绕组构成 …… 490
1.2　绕组参数 …… 490
2　绕组的对称条件 …… 490
3　常规电枢绕组 …… 491
3.1　叠绕组 …… 491
3.2　波绕组 …… 491
3.3　蛙绕组 …… 492
4　特殊电枢绕组 …… 492
5　均压线 …… 493
5.1　分类 …… 493
5.2　根数 …… 493
5.3　截面积 …… 494
5.4　连接 …… 494
第6章　整流电源对直流电动机性能的影响 …… 495
1　脉动电流 …… 495
2　对换向的影响 …… 495
2.1　脉动电流对换向的影响 …… 495
2.2　动态过程中的换向 …… 495
3　对发热的影响 …… 496
4　对振动和噪声的影响 …… 496
5　对绕组绝缘的要求 …… 496
6　电动机的轴电压 …… 496
7　电动机额定电压与整流电源输出电压的匹配 …… 496
第7章　电磁设计 …… 498
1　主要尺寸和极数 …… 498
1.1　主要尺寸 …… 498
1.2　极数 …… 499
2　电枢 …… 500
2.1　电枢绕组 …… 500
2.2　换向器 …… 501
3　电刷 …… 501
3.1　特性和用途 …… 501

3.2 宽度与长度 …… 502
4 空载特性曲线和电枢反应去磁磁动势 …… 502
4.1 空载特性曲线 …… 502
4.2 电枢反应去磁磁动势 …… 504
4.3 励磁绕组 …… 504
5 换向参数和换向极、补偿绕组 …… 505
5.1 换向参数 …… 505
5.2 换向极 …… 506
5.3 补偿绕组 …… 507
6 损耗和效率 …… 507
6.1 铜损耗 …… 507
6.2 铁损耗 …… 507
6.3 电刷接触损耗 …… 508
6.4 机械损耗 …… 508
6.5 杂散损耗 …… 508
6.6 总损耗和效率 …… 508
7 工作特性计算 …… 508
8 发热和通风冷却 …… 509
8.1 热平衡方程和发热曲线 …… 509
8.2 热的传导和表面散热 …… 509
8.3 温升计算 …… 509
8.4 通风冷却 …… 509
第 8 章 结构设计 …… 511
1 结构型式、防护等级、冷却方法和线端标志 …… 511
2 定子 …… 511
2.1 机座 …… 512
2.2 主极 …… 512
2.3 换向极 …… 512
2.4 补偿绕组 …… 512
2.5 定子引出线与连接线 …… 513
2.6 换向极垫片 …… 513
3 电枢 …… 513
3.1 电枢铁心 …… 513
3.2 电枢支架 …… 515
3.3 轴 …… 515
3.4 电枢绕组 …… 515
3.5 均压线 …… 515
3.6 电枢绕组的固定和温度测量 …… 516
3.7 换向器 …… 517
4 电刷装置 …… 520
4.1 结构和基本要求 …… 520
4.2 刷握结构 …… 520
4.3 常用刷握尺寸规格 …… 521
4.4 电刷与刷握的配合 …… 521
5 端盖或端罩 …… 521
6 轴承 …… 521
7 底板 …… 521
第 9 章 试验、安装和维护 …… 522
1 试验 …… 522
1.1 试验项目 …… 522
1.2 试验方法 …… 522
2 安装 …… 525
2.1 安装前准备 …… 525
2.2 底板和轴承座安装 …… 525
2.3 联轴器热套 …… 525
2.4 定子和电枢安装 …… 525
2.5 机组轴线调整 …… 526
2.6 轴承装配 …… 527
2.7 锥套直联式提升电机电枢安装 …… 527
2.8 电机的干燥 …… 527
2.9 试车 …… 528
3 电机的维护 …… 528
3.1 维护 …… 528
3.2 常见故障 …… 528
第 10 章 主要产品 …… 532
1 基本系列 …… 532
1.1 Z4 系列中小型直流电动机 …… 532
1.2 Z 系列中型直流电动机 …… 532
1.3 大型直流电动机 …… 533
2 专用系列 …… 534
2.1 起重、冶金用直流电动机 …… 534
2.2 矿山车辆用牵引电机 …… 534
2.3 直流牵引电动机 …… 535
3 直流电动机功率—转速图与型谱 …… 535
3.1 Z4 系列直流电动机功率—转速图 …… 535
3.2 Z 系列中型直流电动机功率—转速图 …… 536
3.3 轧机用大型直流电机系列型谱 …… 537
3.4 ZZJ-800 系列直流电动机的功率、电压和转速 …… 538
附录 常用符号 …… 539
参考文献 …… 543

第 5 篇 特种电机 …… 545

第 1 章 概论 …… 547
1 概述 …… 547
2 种类和主要特点 …… 547
2.1 永磁电机 …… 548
2.2 伺服驱动与控制类电机 …… 548
2.3 磁阻类电动机 …… 548
2.4 信号检测类电机 …… 548
2.5 非传统电磁原理电机 …… 548
3 特种电机的基本技术标准和技术要求 …… 548
4 应用领域 …… 549
4.1 电气伺服传动领域 …… 549
4.2 信息处理领域 …… 549
4.3 交通运输领域 …… 549
4.4 家用电器领域 …… 549
4.5 消费电子领域 …… 549
4.6 国防领域 …… 549
4.7 特殊用途领域 …… 550
5 发展趋势 …… 550
5.1 国内外发展情况 …… 550
5.2 发展趋势 …… 550
第 2 章 永磁电机磁路计算基础 …… 551
1 永磁材料的性能和选用 …… 551
1.1 永磁材料磁性能的主要参数 …… 551
1.2 几种主要永磁材料的基本性能 …… 552
1.3 永磁材料的选用 …… 557
2 永磁电机的等效磁路 …… 557
2.1 永磁体等效为磁通源或磁动势源 …… 557
2.2 外磁路的等效磁路 …… 558
2.3 永磁电机的等效磁路 …… 558

2.4　主磁导和漏磁导 …… 558
2.5　漏磁因数和空载漏磁因数 …… 558
3　等效磁路的解析法 …… 559
3.1　等效磁路各参数的标么值 …… 559
3.2　等效磁路的解析法 …… 559
3.3　解析法的应用 …… 560
4　等效磁路的图解法 …… 560
5　永磁体的最佳工作点 …… 561
5.1　最大磁能的永磁体最佳工作点 …… 561
5.2　最大有效磁能的永磁体最佳工作点 …… 561
5.3　永磁体最佳工作点的应用及注意事项 …… 561
6　永磁电机电磁场数值分析 …… 561
6.1　永磁电机电磁场数值计算的特点 …… 561
6.2　永磁电机参数计算 …… 563
7　钕铁硼永磁电机的高温失磁问题 …… 564
第3章　永磁直流电动机 …… 566
1　概述 …… 566
1.1　功能和发展概况 …… 566
1.2　分类、特点 …… 566
2　基本工作原理和结构 …… 567
2.1　基本工作原理 …… 567
2.2　结构 …… 567
3　基本特性 …… 568
3.1　额定数据 …… 568
3.2　稳态运行特性 …… 569
4　电枢反应 …… 569
4.1　直轴电枢反应 …… 569
4.2　交轴电枢反应 …… 570
4.3　最大去磁反应 …… 570
5　设计要点 …… 571
5.1　主要尺寸、参数的选取 …… 571
5.2　磁路计算 …… 571
5.3　电枢绕组及冲片设计 …… 572
6　永磁直流伺服电动机 …… 573
6.1　永磁直流伺服电动机的特性与参数 …… 573
6.2　动态特性 …… 574
6.3　设计特点 …… 574
7　永磁直流力矩电动机 …… 574
7.1　工作原理及结构 …… 575
7.2　技术指标 …… 575
7.3　设计要点 …… 575
8　试验及相关标准 …… 576
9　选型和使用 …… 576
9.1　选用原则 …… 576
9.2　应用举例 …… 576
10　典型产品数据 …… 576
第4章　永磁同步电动机 …… 578
1　概述 …… 578
2　结构 …… 578
2.1　总体结构 …… 578
2.2　转子磁极结构 …… 578
2.3　隔磁措施 …… 580
3　稳态性能 …… 580
3.1　稳态运行方程和相量图 …… 580
3.2　稳态运行性能 …… 581
4　磁路分析与计算 …… 581
4.1　磁路计算特点 …… 581
4.2　空载漏磁因数 …… 583
4.3　永磁体工作点的计算 …… 584
5　参数计算和分析 …… 585
5.1　空载反电动势 …… 585
5.2　交、直轴电枢反应电抗 …… 585
5.3　交、直轴电枢磁动势折算系数 …… 586
6　异步起动永磁同步电动机的起动过程 …… 586
6.1　起动过程中的电磁转矩 …… 586
6.2　起动过程中的定子电流 …… 589
6.3　牵入同步过程 …… 589
7　异步起动永磁同步电动机的设计特点 …… 590
7.1　主要尺寸和气隙长度的选择 …… 590
7.2　定、转子槽数的选择 …… 590
7.3　定、转子槽形选择 …… 590
7.4　转子结构设计 …… 590
7.5　永磁体设计 …… 590
7.6　电枢绕组设计 …… 591
7.7　提高异步起动永磁同步电动机功率密度和起动性能的措施 …… 591
7.8　提高异步起动永磁同步电动机效率和功率因数的措施 …… 591
8　永磁交流伺服电动机的设计特点 …… 592
8.1　主要尺寸选择 …… 592
8.2　反电动势常数和转矩常数 …… 592
8.3　机械时间常数和电气时间常数 …… 592
8.4　定位力矩的抑制和低速平稳性的改善 …… 593
8.5　提高永磁同步电动机弱磁扩速能力的措施 …… 593
8.6　无铁心电动机 …… 594
9　盘式永磁电动机的设计特点 …… 595
9.1　盘式永磁同步电动机结构和特点 …… 595
9.2　磁场分布和计算 …… 596
9.3　主要尺寸 …… 598
9.4　磁极设计 …… 599
10　横向磁通永磁电动机的设计特点 …… 599
10.1　原理与特点 …… 599
10.2　基本类型及结构特点 …… 599
10.3　典型结构的磁场分布和计算 …… 600
10.4　功率因数问题 …… 600
10.5　工艺特点 …… 601
11　爪极式永磁同步电动机 …… 601
11.1　转子结构型式 …… 601
11.2　定子结构型式 …… 602
11.3　定向装置 …… 602
11.4　爪极式永磁同步电动机的技术参数 …… 603
12　典型产品数据 …… 603
12.1　纺织化纤永磁电动机 …… 603
12.2　风机泵类用中型变频调速电动机 …… 608
12.3　抽油机用高效高起动转矩永磁同步电动机 …… 608
12.4　无齿轮曳引机用永磁伺服电动机 …… 608
12.5　ST-M 系列永磁交流伺服电动机 …… 608
第5章　永磁同步发电机 …… 611
1　特点和分类 …… 611
2　转子磁极结构 …… 611
2.1　切向式转子磁极结构 …… 611

2.2 径向式转子磁极结构 …… 611
2.3 混合式转子磁极结构 …… 612
2.4 爪极式转子磁极结构 …… 612
3 运行性能和设计特点 …… 613
3.1 励磁电动势和气隙合成电动势 …… 613
3.2 交、直轴电枢反应和电枢反应电抗 …… 613
3.3 固有电压调整率和降低措施 …… 614
3.4 短路电流倍数计算 …… 614
3.5 电动势波形 …… 615
4 混合励磁同步发电机 …… 615
4.1 结构和特点 …… 615
4.2 设计特点 …… 616
5 永磁风力发电机设计特点 …… 617
5.1 电磁负荷选择 …… 617
5.2 定子齿槽的确定 …… 617
5.3 最大起动阻力矩的计算及减小措施 …… 617
5.4 典型产品数据 …… 617
第 6 章 永磁无刷电动机 …… 618
1 概述 …… 618
2 构成及工作原理 …… 618
2.1 系统构成 …… 618
2.2 工作原理 …… 619
3 电枢绕组及其与逆变器的连接 …… 621
3.1 电枢绕组 …… 621
3.2 三相半控、全控电路 …… 622
3.3 多相无刷电动机 …… 623
4 转子位置传感器 …… 624
4.1 光电编码器 …… 624
4.2 磁编码器 …… 625
4.3 旋转变压器 …… 626
4.4 传感技术——无位置传感器控制方法 …… 626
5 基本特性 …… 626
5.1 工作区 …… 626
5.2 基本参数 …… 627
5.3 转矩波动 …… 628
5.4 设计特点 …… 629
6 特种永磁无刷电动机 …… 630
6.1 永磁无刷力矩电动机 …… 630
6.2 无铁心永磁无刷电动机 …… 630
6.3 盘式永磁无刷电动机 …… 631
6.4 无槽永磁无刷电动机 …… 631
7 应用领域 …… 631
7.1 计算机外围设备 …… 631
7.2 声像设备 …… 631
7.3 家用电器 …… 632
7.4 办公设备 …… 632
7.5 电动自行车 …… 632
7.6 工业驱动和控制 …… 632
8 典型规格技术数据 …… 632
第 7 章 伺服电动机控制系统 …… 634
1 概述 …… 634
1.1 作用及组成 …… 634
1.2 基本要求和特点 …… 635
1.3 主要技术指标 …… 635
1.4 分类 …… 636
2 逆变技术 …… 636
2.1 逆变器的基本工作原理 …… 636
2.2 逆变器的工作频率 …… 637
2.3 泵升电压和死区 …… 637
2.4 智能功率模块 …… 638
3 控制技术 …… 638
3.1 数字信号处理器 …… 638
3.2 电流反馈及控制器 …… 638
3.3 速度反馈及控制器 …… 639
3.4 位置反馈及控制器 …… 640
3.5 数字 PI 控制器 …… 640
3.6 数字滤波技术 …… 641
3.7 PWM 生成和功率变换驱动接口 …… 641
3.8 保护和辅助功能 …… 641
3.9 专用集成电路 …… 641
3.10 新型的控制策略 …… 642
4 永磁无刷电动机系统 …… 642
4.1 方波驱动永磁无刷电动机系统 …… 642
4.2 正弦波驱动永磁直流无刷电动机系统 …… 646
5 直流伺服电动机控制 …… 653
5.1 控制回路 …… 653
5.2 全数字直流伺服电动机控制 …… 653
6 感应电动机伺服控制 …… 653
6.1 结构图 …… 653
6.2 转子磁链位置计算 …… 654
6.3 控制软件 …… 654
7 两相交流伺服电动机控制 …… 654
7.1 功能和分类 …… 654
7.2 控制方式 …… 655
第 8 章 步进电动机及驱动系统 …… 656
1 概述 …… 656
1.1 分类 …… 656
1.2 特点 …… 656
1.3 发展与应用 …… 656
2 基本原理和结构 …… 656
2.1 基本工作原理 …… 656
2.2 结构型式 …… 658
3 特性 …… 660
3.1 步进电动机的单步运行 …… 660
3.2 步进电动机的连续脉冲运行及运行矩频特性 …… 660
3.3 步进电动机的起动矩频特性和起动惯频特性 …… 660
4 主要技术指标和参数 …… 661
4.1 主要参数 …… 661
4.2 主要性能指标 …… 661
5 相关技术标准和测试技术 …… 662
5.1 步距角的测定 …… 662
5.2 矩角特性及最大静转矩测量 …… 662
5.3 步距精度的测量 …… 662
5.4 起动矩频特性测量 …… 662
5.5 运行矩频特性测量 …… 663
5.6 起动惯频特性测量 …… 663
5.7 温升测量 …… 663
6 驱动与控制 …… 663
6.1 基本原理 …… 663
6.2 脉冲分配器 …… 664

6.3 恒压驱动方式 …… 665
6.4 高低压驱动方式 …… 665
6.5 恒流斩波驱动方式 …… 666
6.6 调频调压驱动方式 …… 666
6.7 微步驱动方式 …… 667
6.8 步进电动机专用驱动芯片 …… 668
6.9 步进电动机的控制 …… 668
7 设计要点 …… 670
7.1 主要技术要求 …… 670
7.2 基本结构 …… 670
7.3 转子外径 …… 670
7.4 定子主要数据和气隙长度 …… 670
7.5 冲片设计 …… 670
7.6 气隙磁导计算 …… 670
7.7 磁通密度和磁动势 …… 670
7.8 绕组设计 …… 671
7.9 最大静转矩验算 …… 671
8 工艺特点 …… 671
9 选型和应用 …… 671
9.1 步距角的选择 …… 671
9.2 系统的定位精度 …… 671
9.3 转矩的选择 …… 671
9.4 阻尼方法的选择 …… 672
9.5 效率及成本 …… 672
9.6 应用实例 …… 672
10 典型产品技术数据 …… 673
第 9 章 开关磁阻电机驱动系统 …… 676
1 概述 …… 676
1.1 开关磁阻电机驱动系统的基本部件、原理及特点 …… 676
1.2 研究与发展概况 …… 677
2 开关磁阻电动机的基本工作原理和结构 …… 679
2.1 工作原理 …… 679
2.2 相数与定子、转子齿极数的关系 …… 679
2.3 绕组的连接方式与极性分布 …… 679
3 基本电磁关系 …… 680
3.1 基本电路方程 …… 680
3.2 相绕组电流 …… 680
3.3 转矩、功率与能量传递 …… 680
3.4 数学模型 …… 681
3.5 机械特性 …… 681
4 开关磁阻电动机电磁设计要点 …… 682
4.1 设计思想 …… 682
4.2 主要技术指标 …… 682
4.3 主要尺寸与转矩的关系——输出方程 …… 682
4.4 电负荷 A 和磁负荷 B …… 683
4.5 主要尺寸和主要参数选择 …… 683
4.6 转矩计算 …… 684
4.7 损耗计算 …… 684
5 功率变换器设计 …… 685
5.1 主电路拓扑结构设计 …… 685
5.2 功率变换器的容量 …… 685
5.3 开关器件的选择 …… 685
5.4 辅助电路 …… 686
6 控制系统 …… 686
6.1 设计原则 …… 686
6.2 控制原理 …… 686
6.3 控制器的设计概述 …… 687
6.4 举例 …… 687
7 反馈信号检测 …… 688
7.1 位置检测 …… 688
7.2 相电流检测 …… 688
7.3 转速检测 …… 689
8 制动和发电运行 …… 690
8.1 制动运行原理 …… 690
8.2 发电运行 …… 690
9 特种开关磁阻电动机 …… 691
9.1 全距绕组排列的开关磁阻电动机 …… 691
9.2 加辅助绕组的开关磁阻电动机 …… 691
10 单边双励磁的双凸极电动机 …… 692
10.1 永磁式双凸极电动机 …… 692
10.2 具有直流励磁的双凸极电动机 …… 692
11 应用 …… 692
11.1 在电动车辆中的应用 …… 692
11.2 在矿山开采领域中的应用 …… 693
11.3 在石油开采中的应用 …… 693
11.4 在机械制造设备领域中的应用 …… 693
11.5 在家电及食品加工领域的应用 …… 693
11.6 在航空机械中的应用 …… 694
11.7 国内部分产品技术数据 …… 694
第 10 章 低速同步电动机 …… 695
1 概述 …… 695
1.1 分类 …… 695
1.2 功能和特点 …… 695
1.3 发展概况 …… 695
2 基本工作原理和结构 …… 695
2.1 工作原理 …… 695
2.2 结构 …… 697
3 基本理论分析 …… 698
3.1 气隙比磁导波 …… 698
3.2 气隙磁场 …… 699
3.3 基本参数、方程式及电磁转矩 …… 701
4 永磁低速同步电动机的电磁设计要点 …… 704
4.1 技术要求 …… 704
4.2 主要尺寸的确定 …… 704
4.3 电磁计算 …… 706
5 测试技术与技术标准 …… 707
6 典型产品技术数据 …… 708
6.1 TDY 系列永磁低速同步电动机 …… 708
6.2 TYD 系列单相永磁低速同步电动机 …… 708
6.3 TD、TB、TY、TYC、TYJ、TYN 型低速电动机 …… 709
6.4 65TYN 型钕铁硼永磁低速同步电动机 …… 710
第 11 章 磁滞电动机 …… 711
1 概述 …… 711
1.1 分类 …… 711
1.2 功能与特点 …… 711
2 基本工作原理和结构 …… 711
2.1 基本工作原理 …… 711
2.2 结构 …… 712
3 特性 …… 713
3.1 起动特性 …… 713

3.2 运行特性 …… 713
3.3 过励状态 …… 714
3.4 关键技术 …… 714
4 主要技术指标 …… 715
5 相关技术标准和测试技术 …… 716
6 设计要点 …… 716
6.1 定子冲片 …… 716
6.2 转子材料及结构 …… 717
6.3 电磁负荷的选择 …… 717
6.4 极数的选择 …… 717
7 工艺特点 …… 717
8 选型和应用 …… 717
8.1 选型原则 …… 717
8.2 应用举例 …… 717
9 典型产品技术数据 …… 718
第 12 章 交直流两用电动机 …… 720
1 概述 …… 720
2 基本工作原理和结构 …… 720
2.1 基本原理 …… 720
2.2 结构 …… 721
3 工作特性 …… 721
3.1 串励直流电动机的基本特性分析 …… 721
3.2 串励交流电动机的基本特性分析 …… 721
3.3 交直流两用电动机工作特性的比较 …… 722
4 主要技术指标和参数 …… 723
4.1 额定功率 …… 723
4.2 额定转速 …… 723
4.3 温升 …… 723
4.4 功率因数 …… 723
5 技术标准和测试技术 …… 723
5.1 技术标准 …… 723
5.2 测试技术 …… 723
6 设计要点 …… 723
6.1 主要尺寸与参数选择 …… 723
6.2 单相串励电动机计算 …… 724
7 交直流两用电动机换向特点 …… 725
7.1 换向 …… 725
7.2 噪声 …… 726
7.3 无线电干扰 …… 726
8 选型和应用 …… 726
8.1 选型 …… 726
8.2 应用实例 …… 726
9 典型产品技术数据 …… 727
第 13 章 直线电机 …… 732
1 概述 …… 732
1.1 分类 …… 732
1.2 功能与特点 …… 732
1.3 现状与发展 …… 732
2 基本结构、工作原理与选用原则 …… 733
2.1 基本结构 …… 733
2.2 工作原理 …… 734
2.3 应用基础与选用原则 …… 735
3 设计要点 …… 736
3.1 设计准则 …… 736
3.2 设计要点 …… 736
3.3 优化设计 …… 736
4 工艺特点 …… 736
5 测试方法和相关技术标准 …… 737
6 驱动与控制 …… 737
6.1 非伺服驱动控制系统 …… 737
6.2 伺服驱动控制系统 …… 737
7 直线感应电动机及其应用 …… 738
7.1 直线感应电动机的原理、结构与特性 …… 738
7.2 直线感应电动机的应用实例 …… 741
8 直线同步电动机及其应用 …… 742
8.1 直线同步电动机的原理、结构与特性 …… 742
8.2 直线同步电动机应用实例 …… 743
9 直线直流电动机及其应用 …… 743
9.1 直线直流电动机的基本原理、结构与特性 … 743
9.2 直线直流电动机的应用实例 …… 744
10 直线步进电动机及其应用 …… 745
10.1 直线步进电动机的结构与特性 …… 745
10.2 直线步进电动机的应用实例 …… 746
11 其他各种直线电动机及其应用 …… 746
11.1 直线振荡电动机 …… 746
11.2 直线—旋转混合型电动机 …… 747
11.3 直线发电机 …… 748
11.4 非电磁类直线驱动器 …… 748
12 部分产品技术数据与外形尺寸 …… 748
12.1 部分直线感应电动机的技术数据与外形尺寸 …… 748
12.2 部分直线同步电动机的主要技术数据 …… 749
第 14 章 有限转角电动机 …… 751
1 概述 …… 751
2 分类 …… 751
3 有限转角力矩电动机 …… 751
3.1 基本工作原理和结构 …… 751
3.2 工作特性 …… 752
3.3 主要参数的选择 …… 752
3.4 控制 …… 753
4 有限转角摆动电动机 …… 753
4.1 基本工作原理 …… 753
4.2 结构 …… 753
4.3 工作特性 …… 754
4.4 参数的选择 …… 755
4.5 控制 …… 755
5 主要技术指标、技术标准和测试技术 …… 755
5.1 转角与转角—时间特性的测量 …… 755
5.2 转矩与转矩—转角特性的测量 …… 756
5.3 摆动频率与摆角—频率特性的测量 …… 756
5.4 线性误差和重复性误差及其测量 …… 756
5.5 相关技术标准 …… 756
6 工艺特点 …… 756
7 应用 …… 757
8 典型产品技术数据 …… 757
第 15 章 角位传感电机 …… 759
1 概述 …… 759
1.1 分类 …… 759
1.2 特点 …… 759
1.3 发展趋势 …… 759
2 自整角机 …… 760
2.1 分类 …… 760

2.2 结构 …… 760
2.3 工作原理 …… 761
2.4 主要技术指标和参数 …… 763
2.5 设计要点 …… 764
2.6 试验、选用、故障及维护 …… 766
2.7 典型产品技术数据 …… 770
3 旋转变压器 …… 773
3.1 分类 …… 773
3.2 结构 …… 773
3.3 工作原理 …… 774
3.4 主要技术指标和参数 …… 775
3.5 设计要点 …… 776
3.6 试验、选用、故障及维护 …… 777
3.7 典型产品技术数据 …… 780
4 高精度角位传感电机 …… 786
4.1 传统角位传感电机分类 …… 786
4.2 传统角位传感电机结构 …… 786
4.3 传统角位传感电机工作原理 …… 787
4.4 主要技术指标和参数 …… 788
4.5 设计要点 …… 789
4.6 试验、选用、故障及维护 …… 789
4.7 磁阻式多极旋转变压器 …… 791
4.8 感应同步器 …… 792
4.9 典型产品技术数据 …… 796
5 其他角位传感器 …… 798
5.1 D/A（数/模）转换器与A/D（模/数）转换器 …… 798
5.2 差动变压器式传感电机 …… 801
5.3 旋转编码器 …… 802
5.4 速度—角度复合型传感器 …… 806
5.5 典型产品技术数据 …… 808
6 角位传感电机应用 …… 811
6.1 选用 …… 811
6.2 应用领域 …… 811
6.3 应用实例 …… 811
第16章 测速发电机 …… 818
1 概述 …… 818
2 分类、特点和技术标准 …… 818
2.1 分类与特点 …… 818
2.2 技术标准 …… 818
3 直流测速发电机 …… 818
3.1 基本原理和结构 …… 818
3.2 输出特性 …… 818
3.3 主要技术指标 …… 819
3.4 设计制造特点 …… 820
3.5 温度补偿 …… 820
3.6 试验 …… 820
4 交流异步测速发电机 …… 820
4.1 基本原理和结构 …… 821
4.2 输出特性 …… 821
4.3 主要技术指标 …… 822
4.4 零速输出电压产生的原因及降低措施 …… 823
4.5 误差及补偿 …… 823
5 其他型式测速发电机 …… 824
5.1 低速永磁直流测速发电机 …… 824
5.2 永磁直流直线测速发电机 …… 824
5.3 无刷直流测速发电机 …… 824
5.4 脉冲测速发电机 …… 825
6 测速发电机的选型 …… 825
6.1 直流测速发电机的选型 …… 825
6.2 空心杯转子异步测速发电机的选型 …… 826
7 测速发电机的使用、常见故障及维护 …… 826
7.1 直流测速发电机的使用、常见故障及维护 …… 826
7.2 空心杯转子异步测速发电机的使用、常见故障及维护 …… 826
7.3 脉冲测速发电机的使用、常见故障及维护 …… 826
8 测速发电机的应用实例 …… 827
8.1 直流测速发电机的应用实例 …… 827
8.2 空心杯转子异步测速发电机的应用实例 …… 827
8.3 脉冲测速发电机的应用实例 …… 828
9 典型产品技术数据 …… 828
9.1 CY系列永磁式直流测速发电机 …… 828
9.2 CYD系列永磁低速直流测速发电机 …… 829
9.3 CYB系列带温度补偿永磁直流测速发电机 …… 831
9.4 无刷直流测速发电机 …… 831
9.5 CX系列直线测速发电机 …… 831
9.6 CYM系列永磁脉冲测速发电机 …… 832
9.7 CYMD系列电磁式脉冲测速发电机 …… 832
9.8 CK系列空心杯转子异步测速发电机 …… 832
第17章 电机扩大机 …… 833
1 概述 …… 833
1.1 分类 …… 833
1.2 特点 …… 833
2 工作原理、结构和工作特性 …… 833
2.1 工作原理 …… 833
2.2 结构 …… 834
2.3 工作特性 …… 834
3 技术标准、调整及试验 …… 836
3.1 技术标准 …… 836
3.2 电刷调整 …… 836
3.3 试验 …… 836
4 选用原则 …… 836
5 应用实例 …… 837
6 典型产品技术数据 …… 838
第18章 超声波电机 …… 840
1 概述 …… 840
1.1 发展趋势 …… 840
1.2 分类 …… 840
1.3 功能与特点 …… 841
1.4 应用 …… 841
2 行波超声波电机基本原理 …… 842
2.1 压电效应及压电陶瓷 …… 842
2.2 压电方程 …… 843
2.3 压电振子及其等效电路 …… 844
2.4 行波超声波电机基本结构和工作原理 …… 845
2.5 定、转子间接触机理 …… 846
2.6 等效电路分析 …… 847
3 行波超声波电机的设计要点 …… 848
3.1 定子的设计 …… 848
3.2 转子设计 …… 849
4 行波超声波电机的驱动及控制 …… 849

4.1 调速机理 …… 849
4.2 驱动电路的实现 …… 850
4.3 控制技术 …… 851
5 其他超声波电机 …… 854
5.1 步进超声波电机的运行机理 …… 854
5.2 弯曲振动超声波电机 …… 854
5.3 纵扭复合振动超声波电机 …… 854
5.4 球转子多自由度超声波电机 …… 855
6 制造及试验 …… 856
6.1 制造技术 …… 856
6.2 测试技术 …… 857
7 典型产品技术数据 …… 859
第 19 章 其他非传统电磁原理电机 …… 860
1 静电电机 …… 860
1.1 特点 …… 860
1.2 制作技术 …… 860
1.3 工作原理 …… 860
1.4 分类 …… 861
1.5 应用 …… 862
2 光热电机与热磁电机 …… 862
3 微波电机与波导电机 …… 862
4 滚切式电动机 …… 863
5 谐波电动机 …… 863
6 磁致伸缩驱动器 …… 863
6.1 磁致伸缩 …… 863
6.2 磁致伸缩材料和超磁致伸缩材料 …… 863
6.3 超磁致伸缩材料性能 …… 863
6.4 工作原理 …… 864
6.5 应用 …… 865
7 电容式电动机 …… 865
8 形状记忆合金驱动器 …… 865
8.1 形状记忆合金 …… 865
8.2 工作原理 …… 866
8.3 应用 …… 866
9 人工肌肉驱动器 …… 867
9.1 人工肌肉 …… 867
9.2 材料特征 …… 867
9.3 工作原理 …… 867
9.4 应用 …… 867
10 压电型微电动机 …… 867
10.1 制备技术 …… 867
10.2 压电微执行器 …… 867
10.3 压电微电机 …… 868
参考文献 …… 869

第1篇 电机通论

主编单位：上海电器科学研究所(集团)有限公司
哈尔滨大电机研究所
上海交通大学

主　　编：秦　和　迟　速　金如麟

编写人员：秦　和(上海电器科学研究所(集团)有限公司)
金如麟(上海交通大学)
章跃进(上海大学)
叶云岳(浙江大学)
孙玉田(哈尔滨大电机研究所)
黎崇彬(哈尔滨大电机研究所)
李广德(哈尔滨大电机研究所)
黄国治(上海电器科学研究所(集团)有限公司)
陈业绍(上海电器科学研究所(集团)有限公司)
楼鼎富(上海电器科学研究所(集团)有限公司)
金惟伟(上海电器科学研究所(集团)有限公司)
李宝金(上海电器科学研究所(集团)有限公司)
黄　坚(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

第1章 概 论

电机是一种利用电和磁的相互作用实现能量转换、传递的电磁机械装置。发电机从机械系统吸收机械能，向电系统输出电能；电动机则从电系统吸收电能，向机械系统输出机械能；控制电机的主要功能是在机电能量转换的过程中，完成机电信号的检测、转换等任务。

发电机和其他相关设备的技术进步，使人们能利用热能、水能、核能以及风能、太阳能、地热能、生物质能、潮汐能等能源发电，向国民经济各部门和广大城乡居民提供必需的电能。

各种类型的电动机广泛应用于国民经济各部门，以及家用电器中，作为驱动各种机械和设备的动力。

各种类型的特种电机，例如永磁电机、伺服驱动电机和控制电机等，它们在自动控制系统、计算装置和各种特殊应用场合作为伺服驱动、检测、放大、执行、反馈和解算等元件。

总之，随着科学技术的进步、原材料性能的提高和制造工艺的改进，电机以它数以万计的品种规格、多种多样的功率等级（从百万分之几瓦到1000MW以上）、十分宽广的转速范围（从数天1转到每分钟几十万转）、极其灵活的环境适应性，满足国民经济各部门和人们生活的需要。从19世纪以来，电机一直在人类文明史上起着十分重要的作用。

1 电机的基本工作原理

大多数电机的工作原理是建立在电磁感应定律和电磁力定律基础上的。其构造的一般原则是应用有效的导磁和导电材料构成能互相发生电磁感应的磁路和电路，以产生电磁功率和电磁转矩。电磁感应定律是指运动导体在磁场中切割磁力线后，导体中会产生感应电动势，这是叙述发电机原理的基本定律。电磁力定律说明磁场中的载流导体会受到电磁力的作用，这正是电动机通电后产生旋转转矩的基本原理。电磁感应定律和电磁力定律合起来构成电功率和机械功率转换的基础。

据上所述，作为机械系统和电系统能量转换的电机，应具备能作相对运动的两大部件。利用电磁力原理的大多数电机，是由建立励磁磁场（由导体中的电流或永磁体产生）的部件和感应电动势并流过工作电流的被感应部件所组成的。对于旋转电机，这两个部件中静止的称为定子，作旋转运动的称为转子。定、转子之间有空气隙，以便于转子旋转。对于一般采用电磁力原理的电机，在定子和转子上置有绕组，以作为励磁电流和工作电流的载体。电机也可采用永磁体励磁，以取代有关部件上的励磁绕组励磁。

电机的磁场能量基本上储存于气隙中，它使电机把机械系统和电系统联系起来，并实现能量转换，因此气隙磁场又称为耦合磁场。

当电机绕组流过电流时，将产生一定的磁链，并在其耦合磁场内存储一定的电磁能量。磁链及磁场储能的多少随定、转子电流以及转子位置不同而变化，由此产生电动势和电磁转矩，实现机电能量转换。这种能量转换理论上是可逆的，即同一台电机既可作发电机也可作电动机运行。但实际上，电动机和发电机有着不同的技术要求、不同的电机参数和电机特性，通常一台电机制成后，不经改装和重新设计，不可任意改变其运行状态。

电机内部能量转换过程中，存在电能、机械能、磁场能和热能。热能是由电机内部能量损耗所产生的。

对电动机而言：

从电源输入的电能＝耦合磁场内储能增量＋电机内部的能量损耗＋输出的机械能

对发电机而言：

从机械系统输入的机械能＝耦合磁场内储能增量＋电机内部的能量损耗＋输出的电能

应该指出，随着现代科学技术的迅速发展，近年来出现了许多基于各种新原理的特种电机，如超声波电机、微波电动机、静电电机、磁致伸缩驱动器等。有关这类新颖电机的基本工作原理参见本卷第5篇。

2 电机的分类及应用

通常，电机可进行如下分类：

按电机功用分类，可分为发电机、电动机和特种电机。

按电机运动方式分类，可分为旋转电机和直线电机。

按电机电流类型分类，可分为直流电机和交流电机。交流电机又可分为同步电机和感应电机。

按电机相数分类，还可分为单相电机及多相（常用三相）电机。

按电机的容量或尺寸大小分类，可分为大、中、小和微型电机。

电机还可按其他方式（如频率、转速、运动形态、励磁磁场建立与分布等）分类。

按电机的主要类型及用途见表1.1-1。

表1.1-1 电机的主要类型及用途

种类	名 称	主要用途
发电机	1. 交流发电机	
	(1) 汽轮发电机	火力发电厂及核能发电厂
	(2) 水轮发电机	水力发电厂
	(3) 柴油发电机	工厂、矿山、医院、船舶和农村自备电源和移动电源
	(4) 感应发电机	余热发电和水能、风能发电
	(5) 中频发电机	特种电源及高频加热用电源
	2. 直流发电机	各种直流电源和作测速发电机用
电动机	1. 交流电动机	
	(1) 同步电动机	驱动功率较大或转速较低的机械设备，用于大型船舶的推进器
	(2) 感应电动机	
	1) 笼型感应电动机	用于驱动一般机械设备
	2) 绕线转子感应电动机	用于要求起动转矩高、起动电流小或小范围调速的机械设备
	(3) 交流换向器电动机	三相换向器电动机用于驱动需要调速的机械，单相换向器电动机用于电动工具和吸尘器中
	2. 直流电动机	用于冶金、矿山、交通运输等行业，主要驱动需要调速的机械设备
	3. 交直流两用电动机	用于电动工具等
特种电机	1. 永磁电机	用于驱动各种特殊或专用设备以及同步发电机
	2. 伺服驱动与控制类电机	用于伺服驱动系统与自动控制系统
	3. 磁阻类特种电机	用于驱动各种特殊或专用设备
	4. 信号检测类特种电机	用于控制系统中的检测、反馈和解算等
	5. 电动测功机	测定机械功率
	6. 同步调相机	供给或吸收电力网无功功率
	7. 其他特种电机	

上述的电机分类方法是多年来的传统分类方法，在这种分类中形成了直流电机、感应电机和同步电机三大基本电机种类。电机学基本原理按这三大机种组织教学内容，电机生产厂家和研究所按此三大机种进行分工和组织研究、设计和制造。而这三大机种又有着各自不同的应用领域。

直流电机是将直流电能和机械能相互转换的一种电机。直流电动机具有优良的起动、调速等运行性能，长期以来在有调速要求的场合，特别是有高精度、高性能控制要求的自控系统中，直流电动机是首选的驱动电机。但电刷和换向器的机械接触所带来的换向问题是它的致命弱点，大大限制了它的应用范围。

由于近年来电力电子变流技术的发展，直流发电机的应用已越来越少，并趋于淘汰。

感应电机实质上是一种异步电机。后者是泛指负载时的转速与所接电网频率之比不是恒定关系的一种交流电机。在不致引起误解或混淆的情况下，感应电机也可称为异步电机。感应电动机特别是笼型感应电动机，由于其具有结构简单、运行可靠、维护方便和价格低等特点，成为电机行业中生产量最大、应用面最广的驱动电机。但其调速性能差，功率因数低，使其长期以来主要应用于无调速要求或调速要求不高的驱动机械，例如风机、水泵等驱动。

同步电机是指其转速与所接电网频率之比有恒定关系的一种交流电机。同步电机主要应用于交流发电机场合，是电力系统的心脏部分。同步电动机由于其结构较感应电动机复杂，价格也相对较贵，因此在一般的机械设备驱动中应用较少。但由于其功率因数高，较多用于大功率低转速的机械设备，如压缩机、球磨机等。

20世纪60年代以来，电力电子技术、计算机技术的飞速发展出现了许多全新的机电一体化电机，这些新电机的出现极大地冲击了传统电机的应用领域，也冲击了传统电机的理论和分类。最典型的机电一体化电机有无刷直流电动机、磁场定向的永磁同步电动机等。无刷直流电动机用电子开关取代了直流电机中的换向器，用位置检测装置取代了电刷，用永磁材料产生直流电机中的主磁场，完全实现了直流电机的无刷化，同时保留了直流电机传统优点。就是这样的一种新电机，从电机本体看，它完全是一个永磁同步电动机结构，其定子绕组是对称的三相交流绕组，流过的是对称三相交变电流，只是电流波形为交变的方波而已。但它和通常的同步电动机在工作原理上又有本质上的差别，它的电子开关电路的工作由转子磁钢位置决定，故它三相绕组中交流电的频率完全由电机的转速决定，故人们也称它为自同步的永磁同步电动机。同理，如果利用自同步原理，让三相绕组流过三相正弦交变电流，并让定子磁场始终保持与转子磁场相垂直，则该电机就是磁场定向的永磁同步电机，它既是同步电机同时又具有直流电机的控制性能。这两种新型的机电一体化产品已经在电动机市场上异军突起，正在不断抢占传统电机的应用领域。对这些全新电机的分类，不同学者有不同看法，至今仍在争议之中。为此，本卷将这类新颖的机电一体化电机在另一篇中单独加以叙述（参见本卷第5篇特种电机）。

3 电机的基本技术要求

电机基本技术要求包括对电机运行条件、定额和性能等的规定，电机性能分别由本卷其他各篇介绍。

3.1 运行条件

电机的运行条件包括若干环境条件和电气条件，分别要求如下：

（1）海拔

一般不超过1000m。特殊要求下，如某些特种电机的运行海拔可达2500～31200m。

（2）最高环境空气温度

电机运行地点的环境空气温度随季节而变化，一般不超过40℃，但一些专用电机可超过40℃，特种电机的最高环境空气温度为125℃。

（3）最低环境空气温度

对已安装就位、处于运行或断能停转的电机，最低环境空气温度为－15℃；对于某些特种电机，最低环境空气温度为－55℃。下列电机的最低环境空气温度为0℃：

1）以1000r/min为基准的额定输出大于3300kW（或kVA）。

2）额定输出小于600W（或VA）。

3）带换向器。

4）带滑动轴承。

5）以水作为初级或次级冷却介质。

（4）电压和电流的波形和对称性

1）对于交流电动机，当供电电源为频率固定的交流发电机（无论是地区供电或经电网）、供电电压谐波电压因数（HVF）应不超过以下数值：对单相电动机和三相电动机，但不包括N设计电动机（即符合JB/T 8158标准所规定N设计起动性能的一般用途三相电动机），供电电压谐波电压因数应不超过0.02。

N设计电动机供电电压谐波电压因数应不超过0.03。

HVF值按下式计算

$$\mathrm{HVF}=\sqrt{\sum(U_n^2/n)}$$

式中，U_n为谐波电压的标么值（以额定电压U_N为基值）；n为谐波次数（三相交流电动机不包含3及3的倍数），通常取谐波次数$n\leqslant 13$已足够。

三相交流电动机应能在三相电压系统负序分量不超过正序分量的1%（长期运行），或不超过1.5%（不超过几分钟的短时运行），且零序分量不超过正序分量1%的条件下运行。

2）对于交流发电机，应适用于供电给实际无畸变和实际平衡的回路。所谓实际无畸变回路是指当供以正弦波电压时，任何时刻的电流瞬时值与其相应基波瞬时值之差均不超过其基波幅值的5%，所谓实际平衡回路是指供以对称电压时，电流系统的负序分量及零序分量均不超过正序分量的5%。

3）对于同步电机，三相同步电机应能在不平衡系统中连续运行，该系统的各相电流均不超过额定电流，且电流的负序分量（I_2）与额定电流（I_N）之比值，不超过GB 755—2000的规定；同时在故障状态下，应能在$(I_2/I_n)^2$与时间（t）的乘积不超过该标准所规定的数值下运行。

4）对于由静止电力整流器供电的直流电动机，脉动电压和脉动电流将影响电机的性能和温升，与用纯直流电源供电的直流电动机相比，损耗和温升将会增加，换向更困难。因此，按特定电源供电设计的由静止电力整流器供电额定功率超过5kW的电动机，为降低电压电流的波动程度，电机制造厂认为需要时，应备有一个外接电感。额定功率不超过5kW的电动机，只要没有超过设计所规定的额定波形因数，而且电动机的绝缘水平与整流器输入端的交流电压相匹配，则不论有无外接电感，可以适用于任一静止电力整流器，而不局限于某一特定类型的静止电力整流器。

（5）运行期间电压的偏差

1）发电机在额定转速（交流发电机并在额定功率因数）

下，如电压在额定值的95%～105%之间变化，输出功率仍能维持额定值。

2）当电动机的电源电压（如为交流电源时，频率为额定）在额定值的95%～105%之间变化，输出功率仍能维持额定值。当电压发生上述变化时，电机的性能和温升允许偏离规定。

（6）运行期间频率的偏差

当交流电机的频率（电压为额定）与额定值的偏差不超过±2%时，输出功率应仍能维持额定值。

（7）电压和频率同时发生偏差

当电压和频率同时发生偏差（两者偏差分别不超过5%和±2%），若两者都是正值或都是负值，且其绝对值之和不超过7%；或分别为正值和负值，且其绝对值之和不超过5%时，则电机输出功率仍能维持额定值。

（8）运行在不接地系统的三相交流电机

三相交流电机应能在中点为接地电位或接近接地电位的情况下连续运行。三相交流电机也应能在不接地系统中一线处于接地电位的情况下偶然地短时运行。未经向制造厂咨询，不允许将电机的中点相互连接或接地，因为在某些运行条件下这将会产生各种频率零序电流的危险，以及在线端至中点发生故障时，可能使绕组受到损伤。

3.2 工作制和定额

（1）工作制

工作制是电机承受负载情况的说明，包括起动、电制动、空载、断能停转，以及这些阶段的持续时间和先后顺序。工作制是设计和选择电机的基础，共分为10类，主要适用于电动机，但其中某几类也适用于发电机。用户应尽可能准确地表达工作制。在负载不变或按已知方式变化情况下，工作制可用数字或用变量的时间程序图来表达，见表1.1-2。

随着生产自动化程度的提高，要求电机的工作制与之相适应，因此，今后电机工作制分类将更细、更多。

表1.1-2 工作制代号名称及内容

代号	名 称	内 容
S1	连续工作制	在恒定负载下的运行时间足以达到热稳定
S2	短时工作制	在恒定负载下按给定的时间运行，该时间不足以达到热稳定随之即断能停转足够时间，使电机再度冷却到与冷却介质温度之差在2K以内
S3	断续周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段断能停转时间，每一周期的起动电流不致对温升产生显著影响
S4	包括起动的断续周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段对温升有显著影响的起动时间、一段恒负载运行时间和一段断能停转时间
S5	包括电制动的断续周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段起动时间、一段恒定负载运行时间、一段快速电制动时间和一段断能停转时间
S6	连续周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段空载运行时间，但无断能停转时间
S7	包括电制动的连续周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段起动时间一段恒定负载运行时间和一段电制动时间，但无断能停转时间
S8	包括负载—转速相应变化的连续周期工作制	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段在预定转速下恒定负载运行时间和一段几段在不同转速下的其他恒定负载的运行时间，但无断能停转时间

续表

代号	名 称	内 容
S9	负载和转速作非周期变化工作制	负载和转速在允许的范围内变化的非周期工作制，这种工作制包括经常过载，其值可远远超过满载
S10	离散恒定负载工作制	包括不多于4种离散负载值（或等效负载）的工作制，每一种负载的运行时间足以使电机达到热稳定。在一个工作周期中的最小负载值可为零（空载或停机和断能）

工作制类型除用S1～S10相应的代号作标志外，还应符合下列规定：

对S2工作制，应在代号S2后加工作时限；对S3和S6工作制，应在代号后加负载持续率。

例如：S2—60min S3—25% S6—40%。

对S4和S5工作制，应在代号后加负载持续率、电动机的转动惯量 J_m 和负载的转动惯量 J_{ext}，转动惯量均为归算至电动机轴上的数值。

例如：S4—25% $J_m=0.15kg\cdot m^2$ $J_{ext}=0.7kg\cdot m^2$。

对S7工作制，应在代号后加电动机的转动惯量 J_m 和负载的转动惯量 J_{ext}，转动惯量均为归算至电动机轴上的数值。

例如：S7 $J_m=0.4kg\cdot m^2$ $J_{ext}=7.5kg\cdot m^2$。

对S8工作制，应在代号后加电动机的转动惯量 J_m 和负载的转动惯量 J_{ext} 以及在每一转速下的负载与负载持续率，转动惯量均为归算至电动机轴上的数值。

例如：S8 $J_m=0.5kg\cdot m^2$ $J_{ext}=6kg\cdot m^2$

16kW 740r/min 30%；

40kW 1460r/min 30%；

25kW 980r/min 40%。

对S10工作制，应在代号后标以相应负载及其持续时间的标么值 $P/\Delta t$ 和绝缘结构相对预期热寿命的标么值（详见GB 755—2000）。

（2）定额

定额是制造厂对符合规定条件的电机在其铭牌上所标定的全部电量和机械量的数值及其持续时间和顺序。

定额分为六类：连续工作制定额、短时工作制定额、周期工作制定额、非周期工作制定额、离散恒定负载工作制定额和等效负载定额。定额类型的标志方法为：

连续工作制定额——标志方法同S1工作制；

短时工作制定额——标志方法同S2工作制；

周期工作制定额——标志方法同S3～S8工作制；

非周期工作制定额——标志方法同S9工作制；

离散恒定负载工作制定额——标志方法同S10工作制；

等效负载定额——与S3～S10中某一工作制等效，应标志为“equ”。

定额类别的选定应按下列原则：

按一般用途制造的电机应具有连续工作制定额，并能以S1工作制运行。如用户未提出电机的工作制，则认为是S1工作制，其定额为连续工作制定额。

对用于短时工作制定额的电机，其定额应以S2工作制为基准。

对用于可变负载或负载包括空载、停机和断能的电机，其定额应以S3～S8工作制之一为基准的周期工作制定额。

对用于转速变化负载亦变化，包括过载的电机，其定额应以S9工作制为基准的非周期工作制定额。

对用于离散恒定负载，包括过载或空载（或停机和断能）的电机，其定额应以S10工作制为基准的离散恒定负载

定额。

4 电机的发展趋势

我国和全世界发电量的80%左右是由汽轮发电机（火电或核电）提供的。汽轮发电机制造技术的重要发展方向，除了提高现有汽轮发电机性能、可靠性和发展燃气-蒸汽联合循环运行所需的汽轮发电机，以及降低煤耗、减少污染、提高可用率外，是核电、火电的大容量化，我国目前核电机组容量4极已达1300MVA，国际上最大的2极机为1300MVA，4极机为1650MVA。由于经济发展对能源需求的日益增加，我国水力发电得到了很大的发展，长江三峡840MVA水轮发电机组的容量已为世界最大容量，目前我国电机制造业正在研制1000MVA级的水轮发电机组。为解决电网用电峰谷之差，建设抽水蓄能电站是解决系统电网调峰和提高核电站负荷因子的重要途径。国际上已投入运行的蓄能水电机组的最大单机容量已达660MVA。

可持续发展的环保要求以及能源短缺的局面，带来了全球能源多样化发展的格局，在继续发展常规能源的同时，新的再生能源日益受到重视，其中风电已成为世界上增长最快的能源，近年装机容量每年增加超过30%。单机容量750kW的风电机组已批量生产，国际上5MW的风电机组已研制成功并进入小批生产，目前正在发展10～20MW的风电机组。

由于电动机是工业领域主要的原动机，三分之二以上的工业用电由其传递，因此提高其本身的电能利用率，对于能源节约和环境保护具有重要意义，为此国内外已纷纷发展了高效率感应电动机，该类产品比传统的一般效率电机的损耗下降20%左右，近年来国际上又出现损耗下降超过30%以上的所谓超高效率电动机。由于永磁体的应用可省去励磁损耗，因此永磁同步电机和永磁直流电动机的产品品种和产量与日俱增。同时，由于我国经济的持续增长，对于各种轧机、高炉风机、铁道牵引、轨道交通、舰船动力、排灌用泵、电站给水泵等主辅机传动用的大型交、直流电动机，单机容量正在增大，品种正在增多，耐高温、耐低温和超高速电动机的应用也日趋增加。

以工业、办公室和家庭自动化为契机，国内外都致力于发展微电子技术、机器人和家用电器所需的各种微特电机。为满足日益提高的高可靠性、高精度、快速响应及数字控制等方面的要求，微特电机正在向机电一体化、无刷化、无铁心化和永磁化方向发展。

用于控制计算机和通信系统以及医疗器械微型自动装置的微型电动机，正在向超微型方面发展，国外已研制出直径为560μm，每秒钟摆动10万余次的摆动式电动机。此外，利用压电、压磁元件的超声波特性的各种微特电机正在得到大力的发展。

近年来，无论是在电机励磁磁场的产生方法，还是在精密电气传动中具有伺服控制功能的机电一体化电机，甚至是非传统电磁原理的各种新型电机都取得了明显的进步和突破。特种电机已经成为电机技术领域中极具发展潜力和最活跃的分支。

采用电力电子技术、微电子技术及现代控制理论，革新传统结构，发展机电一体化产品，是电机发展的必然趋势。同步发电机的励磁晶闸管化，直流电动机广泛采用晶闸管整流器供电，交、直流电动机采用电力电子和微电子装置进行调速控制，数千千瓦的变频调速电动机传动系统、无换向器电动机系统已在电站、矿山、冶金和化工等领域应用。除了应用于生产工艺需要调速的场合，变频调速已越来越多地应用于风机水泵等通用机械需要改变流量的场合，从而可节约大量的能源。在电机调速领域中，变频调速已逐步登上了主导地位，高压大容量交流变频调速系统已开始广泛应用于冶金、矿山和化工等领域。此外，采用电力电子电路系统的软起动和节能装置与感应电机配套，为电机运行节能开辟了新的途径。交流伺服电机及无刷直流伺服电机系统，在结构上已呈现机电一体化趋向。以微机为核心，电机为对象的智能电机，已开发问世。

采用新材料以不断提高电机性能是电机产品更新的主要措施之一。

绝缘材料总的发展趋势是发展耐高电压、温度指数高、无公害的绝缘；发展耐深冷、耐辐照、耐腐蚀、耐水、耐油及高阻、低损耗等特殊绝缘。同时，力争减薄电机绝缘厚度，缩小电机体积；提高绝缘结构总体温度指数，提高电机出力。为此，大容量高压发电机采用环氧云母绝缘体系，耐热等级为F级；中型高压电机采用F级环氧粉云母整体绝缘结构；中小型低压电机中，交流电动机也普遍采用F级绝缘，直流电机和起重及冶金用电机趋向采用F级或H级绝缘。由于静止变频电源的应用日益增多，耐高频脉冲电压的绝缘材料得到迅速的发展。

电机用硅钢片的发展趋势，主要是提高硅钢片的磁性能，并降低单位质量损耗。目前最高磁通密度值可达$B_{10}=2.03$T，单位质量损耗$p_{17/50}=1.04$W/kg。此外，某些铁基非晶态硅钢片由于其铁损耗仅为一般硅钢片的30%，目前已在变压器上得到了较多的应用。国外也用此类材料制成250W的三相感应电动机，其铁损耗比无取向硅钢片制成的同规格电机的低80%以上，但是这种材料的硬度是硅钢片的5倍，加工剪切困难，同时随着温度升高损耗急剧增加，需选用较低磁通密度，因此能否在旋转电机中推广应用尚在研究中。

采用稀土永磁材料制造交、直流电机，可使电机的体积小、质量小、磁性能稳定、运行可靠、效率高、节约电能。国内外已大量采用钕铁硼、铝镍钴和铁淦氧等永磁材料，制造印制绕组电机、盘式绕组电机、空心杯转子电机、无刷直流电机、宽调速直流电机、汽车电机、低速同步电机和用于仪器仪表、农业、交通和家用电器等方面的电机。永磁材料的发展趋势是提高磁能积和热稳定性，并进一步降低成本。

超导材料的电流密度可达10^5A/cm^2，磁场强度可达几到十几特斯拉，在超导交流发电机中，用超导直流励磁绕组，可将电机气隙的磁通密度最大值提高到5～6T。国外已研制成多台2～7万kW的试验样机。随着超导材料性能的改进和超导技术的完善，特别是今后高临界温度的超导材料进入工业性生产后，必将会带来电机技术的革新和发展。

第2章　电机设计及分析基础

1　设计技术要求

1.1　设计依据

通常，电机设计的依据是：

1）电机用途（电动机、发电机、特殊用途电机）。

2）与之连接的电系统对电机的要求（电流、电压、频率、相数等）。

3）与之连接的机械系统及工作环境对电机的要求（几何尺寸、质量、结构及安装型式、防护类型、冷却方式、飞逸转速或超速转速、转动惯量等）。

4）额定数据、运行方式和不同用途所要求的各种性能指标（功率、转速、工作制、效率、功率因数、起动性能、换向性能、励磁性能、电压变化率、电压波形畸变率、振动与噪声限值以及电机对无线电干扰的限值等）。

5）电机及各组成部分承受电气、机械、热负载的能力（如绕组绝缘等级及各部分温升限值、绕组绝缘的介电强度、转子的机械强度等）。

6）有关的国家标准、专业标准、设计任务书以及用户提出的其他要求。此外，还应考虑生产的可能性和经济合理性。

电机常用的国家标准列于表1.2-1。表中标准编号冠以“GB”为国家强制性标准，冠以“GB/T”为国家推荐性标准。

表1.2-1　　电机常用标准

序号	标准编号	标准名称	与国际标准对应情况
1	GB 755	旋转电机定额和性能	IEC 60034-1
2	GB 1971	电机线端标志与旋转方向	IEC 60034-8
3	GB 10068	轴中心高为56mm及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值	IEC 60034-14
4	GB 10069.3	旋转电机噪声测定方法及限值 噪声限值	IEC 60034-9
5	GB 12350	小功率电动机的安全要求	
6	GB 14711	中小型旋转电机安全通用要求	
7	GB 18613	中小型三相异步电动机能效限定值及节能评价值	
8	GB/T 755.2	旋转电机（牵引电机除外）确定损耗和效率的试验方法	IEC 60034-2
9	GB/T 756	旋转电机圆柱形轴伸	ISOR 775
10	GB/T 757	旋转电机圆锥形轴伸	ISOR 775
11	GB/T 997	电机结构及安装型式代号	IEC 60034-7
12	GB/T 1993	旋转电机冷却方法	IEC 60034-6
13	GB/T 4772.1	旋转电机尺寸和输出功率等级　第1部分：机座号56～400和凸缘号55～1080	IEC 72
14	GB/T 4772.2	旋转电机尺寸和输出功率等级　第2部分：机座号355～1000和凸缘号1180～2360	IEC 72
15	GB/T 4772.3	旋转电机尺寸和输出功率等级　第3部分：小功率装入式电机和凸缘号BF10～BF50	IEC 72
16	GB/T 4831	电机产品型号编制方法	
17	GB/T 2900.25	电工名词术语　旋转电机	IEV 50（411）
18	GB/T 4942.1	旋转电机外壳防护分级（IP代码）	IEC 60034-5
19	GB/T 10069.1	旋转电机噪声测定方法及限值　噪声工程测定方法	
20	GB/T 10069.2	旋转电机噪声测定方法及限值　噪声简易测定方法	
21	GB/T 17948	旋转电机绝缘结构功能性评定　总则	IEC 60034-18-1
22	GB/T 17948.1	旋转电机绝缘结构功能性评定　散绕绕组试验规程热评定与分级	IEC 60034-18-21
23	GB/T 12351	热带型旋转电机环境技术要求	
24	GB/T 12665	电机在一般环境条件下使用的湿热试验要求	
25	GB/T 13002	旋转电机装入式热保护旋转电机的保护规则	
26	GB/T 5171	小功率电动机通用技术条件	
27	GB/T 7064	透平型同步电机技术要求	IEC 60034-3
28	GB/T 7409.1	同步电机励磁系统　定义	IEC 60034-16
29	GB/T 7409.2	同步电机励磁系统　电力系统研究用模型	
30	GB/T 7409.3	同步电机励磁系统　大型同步发电机励磁系统技术要求	
31	GB/T 10585	中小型同步电机励磁系统基本技术要求	
32	GB/T 13957	大型三相异步电动机基本系列技术条件	
33	GB/T 13500	封闭式制冷压缩用三相异步电动机　通用技术条件	
34	GB/T 13501	封闭制冷压缩机用电动机绝缘耐氟试验方法	
35	GB/T 14816	井用潜油三相异步电动机通用技术条件	
36	GB/T 15548	往复式内燃机驱动的三相同步发电机通用技术条件	
37	GB/T 12973	换向器和集电环的尺寸	
38	GB/T 5089	交流电风扇电动机通用技术条件	
39	GB/T 12974	交流电梯电动机通用技术条件	
40	GB/T 6656	铁氧体永磁直流电动机	
41	GB/T 5321	用量热法测定大型交流电机的损耗与效率	IEC 60034-2A
42	GB/T 8916	三相异步电动机负载率现场测试方法	
43	GB/T 1029	三相同步电机试验方法	
44	GB/T 1032	三相异步电动机试验方法	
45	GB/T 9651	单相异步电动机试验方法	
46	GB/T 1311	直流电机试验方法	
47	GB/T 8128	单相串励电动机试验方法	
48	GB/T 13958	无直流励磁绕组同步电动机试验方法	
49	GB/T 14481	单相同步电机试验方法	

1.2 设计基本内容

电机设计按照工作性质可分为电磁设计和结构设计两个方面。

电磁设计是根据设计技术要求确定电机的电磁负荷、与电磁性能有关的有效部分的尺寸和绕组数据，选定材料，并核算电磁性能及有关参数。

结构设计是根据设计技术要求及电磁设计确定的数据，确定电机的机械结构、零部件尺寸、材料的规格、性能及加工要求，包括必要的机械计算及通风和温升计算，并绘制施工图。

电机设计按照工作进程，又可分为初步设计、电磁设计和施工设计三个阶段。初步设计主要是确定电机的总体结构型式，这是电磁设计的基础；而施工设计则是实现电磁设计的保证，二者即构成上述的结构设计。

良好的设计应该是在满足设计技术要求的前提下，具有尽可能低的制造成本，同时应该具有高的可靠性和便于维护。

对于大批量生产的通用电机，一般都成系列设计和制造，设计时应充分考虑标准化、系列化、通用化。对于多品种小批量生产的电机产品，应重视模块化设计。它侧重在部件级的标准化，在功能分析、分解的基础上建立模块，以组合成多种产品品种、规格，从而可快速经济合理地满足用户的不同需求。

2 电机的主要尺寸

2.1 利用系数及电磁负荷

电机的主要尺寸指气隙处的铁心直径 D 和铁心轴向长度 l。它们通常根据设计技术要求中最重要的两个因素，即功率（或容量）和转速来确定，然后为满足其他要求进行修正。

表示电磁功率、转速和 D、l 之间的关系式称为功率方程，通常电磁功率为

$$S = CD^2 l' n \quad (\text{kVA 或 kW}) \qquad (1.2\text{-}1)$$

式中，C 为电机利用系数，kVA·min/m³ 或 kW·min/m³；D 为交流电机定子铁心内径或直流电机电枢外径，m；l' 为交流电机定子铁心有效长度或直流电机电枢有效长度，m，所谓有效长度是指考虑了气隙磁场在轴向分布后的铁心或电枢长度；n 为交流电机同步转速或直流电机额定转速，r/min。

电磁功率，对交流电机

$$S = mEI_N \times 10^{-3} \quad (\text{kVA})$$

式中，m 为定子相数；E 为电机满载时定子绕组每相电动势，V；I_N 为定子额定相电流，A。

对直流电机

$$S = E_a I_a \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中，E_a 为电枢绕组电动势，V；I_a 为电枢绕组电流，A。

由式（1.2-1）可得交流电机的利用系数 C 的表达式为

$$C = \frac{S}{D^2 l' n} \approx 0.116 K_{dp} A B_\delta \times 10^{-3} \quad (\text{kVA} \cdot \text{min/m}^3) \qquad (1.2\text{-}2)$$

式中，K_{dp} 为绕组因数；A 为电负荷，A/m；B_δ 为气隙磁通密度基波幅值，T。

由式（1.2-1）可得直流电机的利用系数 C 的表达式为

$$C = \frac{S}{D^2 l' n} \approx 0.164 \alpha_\delta A B_\delta \times 10^{-3} \quad (\text{kW} \cdot \text{min/m}^3) \qquad (1.2\text{-}3)$$

式中，α_δ 为极弧系数；B_δ 为气隙磁通密度最大值，T。

由式（1.2-2）和式（1.2-3）可见，电机利用系数表示电机有效部分单位体积、单位同步转速（或额定转速）的电磁功率。它正比于电磁负荷（A 与 B_δ 的乘积），反映了材料的利用水平。随着电机冷却技术的发展，材料、工艺和设计水平的提高，利用系数也有了相应的提高。另外，随着电机的特性、用途以及功率大小的不同，利用系数也在一个较大的范围内变动。对于一般空气冷却的电机，其利用系数约为1.5～9；而对于直接氢冷或水冷的电机，其利用系数约为3～20。由于利用系数数值对不同功率、不同冷却方式的电机变化范围颇大，主要的并不着重于其具体数值的大小，而着重于研究其随电磁负荷如何变化，以及明确其物理意义。

电磁负荷 A、B_δ 值不仅决定电机的利用系数，直接影响电机有效材料用量，见式（1.2-2）和式（1.2-3），更为重要的是，A、B_δ 值与电机的运行参数和性能（功率因数、起动性能、过载能力和直流电机的换向性能等）密切相关。

电负荷 A 表示沿定子内腔（或电枢）圆周上单位长度的安培导体数，即

$$A = \frac{QZ_Q I}{\pi D a} \quad (\text{A/m})$$

式中，Q 为槽数；Z_Q 为每槽导体数；I 为电流，A；a 为并联支路数。

气隙磁通密度为

$$B_\delta = \frac{2p\Phi}{\pi D l \alpha} \quad (\text{T})$$

式中，p 为极对数；Φ 为每极磁通，Wb；α 为平均磁通密度（对应于每极磁通 Φ）与最大磁通密度之比。对于正弦气隙磁场分布，其值等于 $2/\pi$。

提高电磁负荷乘积 AB_δ，可提高有效材料的利用率，但磁负荷 B_δ 受到铁心磁路饱和以及铁心中损耗的限制，而电负荷 A，则受导体中产生的损耗、温升及大部分由槽深所影响的漏抗的限制。电磁负荷推荐值见表 1.2-2。

表 1.2-2 电磁负荷 A、B_δ 推荐值

电磁负荷		同步电机	感应电机	直流电机
B_δ（T）		0.6～1.1	0.5～0.85	0.5～1.1
$A\times10^3$（A/m）	空冷	3～9	2～9	2～8
	水冷	9～11	—	—
	导体直接冷却	8～25	—	—

电磁负荷及其相互关系很难用固定的原则来确定，在实际设计中，较多参考采用已有的同类产品的统计平均值。

2.2 主要尺寸比

电机有效部分长度与直径或极距的关系可用比值 λ 表示。比值 λ，对交流电机为定子铁心有效长度与极距之比，而对直流电机常指电枢铁心长度与直径之比。当电磁负荷 A、B_δ 范围初定后，按式（1.2-2）和式（1.2-3）即可初步确定有效部分体积 $D^2 l$。故 λ 值一旦选定后，即可确定电机有效部分的尺寸 D 和 l。比值 λ 较大的电机呈细长形，一般较经济，尤其对希望转动惯量较小的调速电机较合适，但其通风冷却条件往往相对较差；比值 λ 较小的电机呈粗短形，具有较长的端部绕组，通风冷却条件相对较好。λ 值的选择往往参考实际同类电机的平均值。根据不同种类和不同用途，电机 λ 值的变化范围较大，通常为 0.5～4，甚至更大。

2.3 气隙

气隙长度 δ 对电机的性能影响较大。气隙长度的减小，可减少电机励磁安匝及损耗。如果气隙长度过小，气隙谐波

磁场增大，电机杂散损耗及电磁噪声增加；还会使同步电机的同步电抗增大，短路比 K_c 减小，运行稳定性变差；使直流电机的换向性能变坏；同时过小的气隙，将会由于机械和电磁的原因，对运行可靠性带来一定影响。因此，气隙的选择需综合考虑其对各项主要性能的影响，并参考实际电机的统计平均值。实际上，视电机大小 δ 可在零点几毫米至几十毫米范围内变化。

3　绕组

3.1　绕组概述

根据所起作用不同，绕组主要分两大类：一类是为了产生气隙主磁通的主极励磁绕组；另一类是与主磁通相对运动感生电动势的电枢绕组。异步电机的定子绕组兼起励磁绕组的作用，转子绕组则感生电动势与电流。直流电机除电枢绕组和励磁绕组外，为了改善换向，大都装有换向极绕组和补偿绕组；为了防止振荡和改善某些性能，或因起动需要，同步电机一般装有阻尼绕组，但对于小型电机，这些绕组往往可以省略。

交流电机中的电枢或定子绕组，简称为交流绕组；直流电机中的电枢绕组，称为直流电枢绕组。

交流绕组有多种分类方法：按绕组布置分类，有集中绕组及分布绕组；按相带分类，有 120°、60°和 30°相带绕组；按每极每相槽数 q 分类，有整数槽绕组及分数槽绕组；按槽内线圈边层数分类，有单层绕组、双层绕组和单双层绕组；按线圈形状和端部连接方式分类，有叠绕组、波绕组以及同心式、链式、交叉式绕组。

直流电枢绕组，一般按绕组元件与换向片之间连接规律不同而分为叠绕组、波绕组和蛙绕组。

3.2　交流绕组

3.2.1　交流绕组的构成原则

交流绕组的构成原则是：

1）在一定的导体数下，绕组的合成磁动势及电动势在空间波形分布上力求接近正弦波形，在数量上力求获得较大的基波磁动势和基波电动势，而且绕组的损耗要小，用铜量要省。

2）对多相绕组各相磁动势和电动势要对称，电阻和电抗要平衡。

交流绕组根据相数，有单相、两相、三相和六相等接线方法，大多采用三相，但在小功率电机中，单相采用较多。

一般三相接线是将 360°电角度（两个极距）按 60°等分成六个相带（60°相带），形成六个线圈组。将相差 180°相角的线圈组反向连接起来，便构成三相。

绕组通以电流时，沿电机气隙圆周分布着磁动势，称之为绕组磁动势。磁动势和电动势在分析时具有相同的数学形式，分析磁动势的方法可直接应用于电动势，反之亦然。

分析绕组磁动势（电动势）有四种基本方法，即相量法、槽号相位法、复数解析法和电子计算机求解法。其中相量法（即每只线圈电动势或磁动势用一相量表示）是最基本的经典方法。槽号相位法和复数解析法都是从相量法发展而来的，而电子计算机求解法则是利用现代化运算工具来完成上述后两种分析法，实现了绕组分析的自动化，详见参考文献。

3.2.2　整数槽绕组和分数槽绕组

每极每相槽数 q 为整数的绕组，称为整数槽绕组。整数槽双层绕组的最大并联支路数 $a_{max}=2p$，所采用的并联支路数 a，应满足 $2p/a$ 等于整数的要求。每极每相槽数 q 为分数的绕组称为分数槽绕组。q 值可表示为 $q=b+c/d$（式中 b 为整数，c/d 为不可约的分数）。这两种绕组都可用槽电动势相量星形图分析。现举双层分数槽绕组为例。设极对数 p 与槽数 Q 的最大公约数为 t，则由 $p_0=p/t$ 对极下的 $Q_0=Q/t$ 个槽电动势相量可组成一个完整的槽电动势星形图（基本星形），如图 1.2-1 所示。分数槽绕组共有 t 个重叠的基本星形，按槽号（或线圈号）顺序列出的各槽（线圈）所属相带见表 1.2-3。

表 1.2-3　　分数槽绕组槽号与相带

（$p=5$，$Q=36$，$q=1\frac{1}{5}$）

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
所属相带	A	A—C		B—A		C—B		B	A—C		B—A		C	C—B		A—C		B
一相带内的槽数	2		1	1	1	1	2		1	1	1	1	2		1	1	1	1
槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
所属相带	—A—A		C—B		A—C		B		B—A		C—B		A—C—C		B—A		C—B	
一相带内的槽数	2		1	1	1	1	2		1	1	1	1	2		1	1	1	1

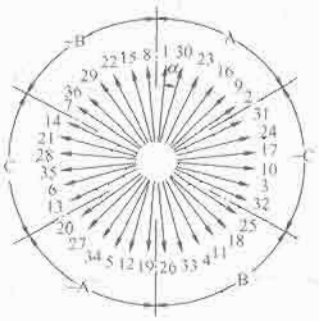


图 1.2-1　分数槽绕组的槽电动势相量星形图

$p=5$；$Q=36$；$q=1\frac{1}{5}$；$t=1$

表 1.2-3 中绕组一相（如 A 相）所占槽数为有规则的数列 21111 的循环，确定这一循环数列，便可确定分数槽绕组的相带划分及绕组连接。一般情况下，一个循环数列共有 d 个数，其中 c 个是大数，$d-c$ 个是小数，大数等于 $b+1$，小数等于 b，数列的排列次序，可把大数与小数按接近均布的原则互相插入。

分数槽绕组的基本对称条件为，每一基本星形的槽电动势相量数应能被相数整除，即 $Q_0/m=$整数。其中，当 $Q_0/m=$偶数，即 $d=$奇数时，Q_0 个相量可分为大小相等的六个相带，可接成单层绕组或双层绕组；当 $Q_0/m=$奇数，即 $d=$偶数时，Q_0 个相量只能分为三个大相带和三个小相带，通常大、小相带差一个相量，这时一般接成双层绕组，仅在 $Q_0/m=$偶数时，才能接成单层绕组。

分数槽绕组接成双层绕组时的最大并联支路数 a_{max}，当 $Q_0/m=$偶数时为 $2t$，当 $Q_0/m=$奇数时为 t，或者表示为 $a_{max}=2p/d$。所采用的并联支路数 $a_{max}=2p/d$，应满足 $a_{max}/a=$整数。

3.2.3　三相交流绕组

常用的三相交流绕组型式有单层同心式、单层交叉式、单层链式、双层叠绕、双层波绕和单双层绕组。

单层绕组每槽放一个线圈边，它等效于全距分布绕组。单层同心式绕组由几何尺寸和节距不等的线圈连成同心形状的线圈组构成，其绕组展开图示例如图 1.2-2 所示。单层交叉式绕组用于 q 为奇数时，绕组由线圈个数和节距不等的两种线圈构成，其展开图示例如图 1.2-3 所示。单层链式绕组由形状、几何尺寸和节距相同的线圈连成，其展开图示例如图 1.2-4 所示。

双层绕组每槽分上下两层放两个线圈边。双层绕组所有线圈的形状、几何尺寸相同，端部排列整齐，可选择有利节距，

以改善电动势和磁动势波形。双层绕组分为叠绕组及波绕组，其线圈形状及节距如图 1.2-5 所示。叠绕组线圈的合成节距 $Y_s = Y_1 - Y_2$，常取为 1；波绕组 $Y_s = Y_1 + Y_2 \approx 2\tau$（$\tau$ 为极距）。线圈节距可分为整距（$Y = \tau$）、短矩（$Y_1 < \tau$）或长距（$Y_1 > \tau$）。

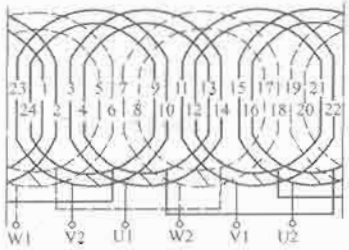


图 1.2-2 单层同心式绕组展开图
$p=1$；$Q=24$；$q=4$

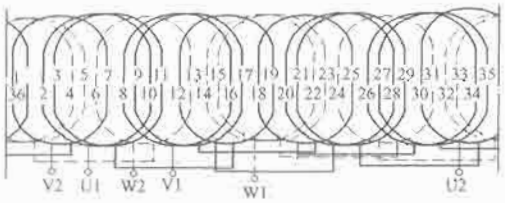


图 1.2-3 单层交叉式绕组展开图
$p=2$；$Q=36$；$q=3$

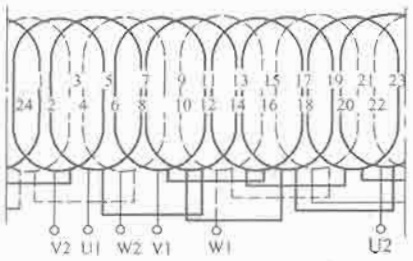


图 1.2-4 单层链式绕组展开图
$p=2$；$Q=24$；$q=2$

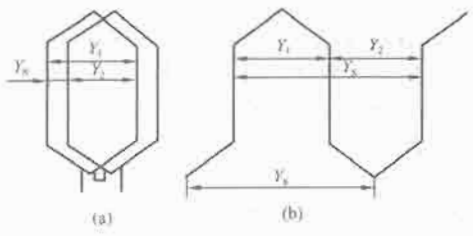


图 1.2-5 叠绕组和波绕组线圈形式和节距
（a）叠绕组线圈；（b）波绕组线圈
Y_1—前节距；Y_2—后节距；Y_s—合成节距

双层叠绕组展开图示例如图 1.2-6 所示，它广泛用于大、中、小型同步电机及感应电机的定子绕组。双层波绕组展开图示例如图 1.2-7 所示，它可减少线圈组之间的连接线，常用于多极数凸极同步电机。特别是水轮发电机的定子绕组及绕线转子感应电机的转子绕组。用于绕线转子时习惯采用图 1.2-7（b）的简化连接。这种连接每相有一个槽仅放一根特型导体（如 A 相为第 8 槽），这可省去连接线，但使绕组进线、出线端位于转子两端，这种绕组可能由于绕组磁动势不平衡而引起振动，应予以注意。

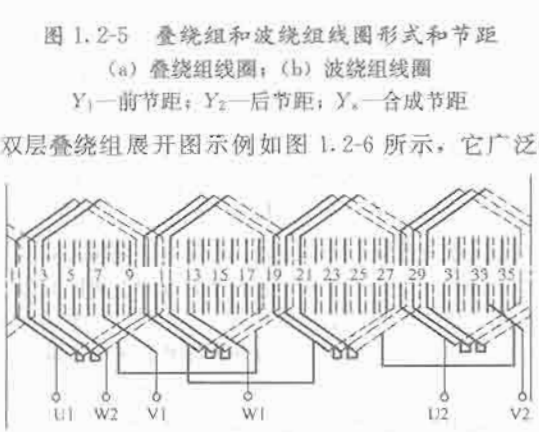


图 1.2-6 双层叠绕组展开图（仅画一相）
$p=2$；$Q=36$；$q=3$；$Y=8$

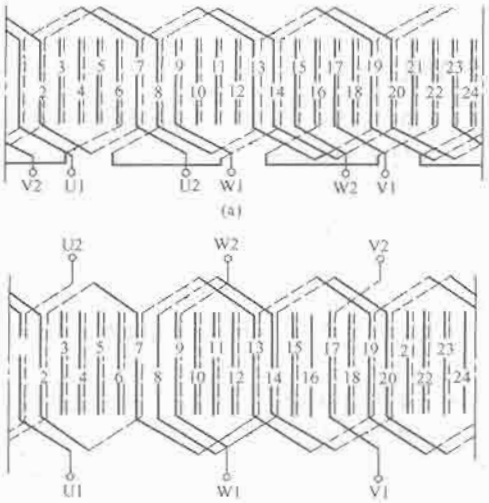


图 1.2-7 双层波绕组展开图（仅画一相）
（a）正常连接；（b）简化连接
$p=2$；$Q=24$；$q=2$

3.2.4 绕组感应电动势及绕组因数

绕组每个线圈的感应电动势可按电磁感应定律求得，若每极磁通 Φ 以频率 f 相对于匝数为 N_c 的线圈作周期性变化，则线圈的感应电动势有效值为 $E=4fN_c\Phi$。

对交流电机，感应电动势按有效值计算，若绕组每相串联匝数为 N，并用绕组因数 K_{dp} 来考虑线圈分布和短距的影响，则绕组感应电动势为

$$E = 4K_W f\Phi NK_{dp} \quad (V) \tag{1.2-4}$$

式中，K_W 为波形因数，若气隙磁场为正弦分布，$K_W = \pi/2\sqrt{2} = 1.11$。

感应电动势的谐波分量为

$$E = 4.44 f_\nu \Phi_\nu NK_{dp\nu} \tag{1.2-5}$$

式中，f_ν、Φ_ν、$K_{dp\nu}$ 为对应于 ν 次谐波的频率、磁通和绕组因数。

绕组因数 K_{dp} 是分布因数 K_d 和短距因数 K_p 的乘积，对于基波

$$K_{dp} = K_d K_p \tag{1.2-6}$$

对于 ν 次谐波

$$K_{dp\nu} = K_{d\nu} K_{p\nu} \tag{1.2-7}$$

对于整数槽绕组，分布因数可用下式表示

$$K_d = \frac{\sin(\pi/2m)}{q\sin(\pi/2mq)} \tag{1.2-8}$$

对于 ν 次谐波

$$K_{dp\nu} = \frac{\sin(\nu\pi/2m)}{q\sin(\nu\pi/2mq)} \tag{1.2-9}$$

表 1.2-4 列出了三相 60°相带整数槽绕组分布因数。

表 1.2-4　三相 60°相带整数槽绕组的分布因数 K_d

谐波次数	q							
	1	2	3	4	5	6	10	∞
1（基波）	1	0.966	0.96	0.958	0.957	0.956	0.955	0.955
5	1	0.259	0.218	0.205	0.200	0.197	0.193	0.191
7	1	0.259	0.177	0.158	0.150	0.145	0.140	0.136
11	1	0.966	0.177	0.126	0.109	0.102	0.092	0.087
13	1	0.966	0.218	0.126	0.102	0.092	0.079	0.073
17	1	0.259	0.96	0.158	0.102	0.084	0.064	0.056
19	1	0.259	0.96	0.205	0.109	0.084	0.060	0.050

对于分数槽绕组（$q=b+c/d$），其基波的分布因数为

$$K_d=\frac{\sin(\pi/2m)}{(bd+c)\sin[\pi/2m(bd+c)]} \tag{1.2-10}$$

短距因数可用下式表示

$$K_p=\sin(\beta\pi/2) \tag{1.2-11}$$

$$K_{p\nu}=\sin(\nu\beta\pi/2) \tag{1.2-12}$$

式中，β 为线圈节距（用小数表示）。

以上绕组因数计算方法是从线圈为单元出发，另有一种计算方法是从线圈边为单元出发，即直接从各线圈边电动势几何和与算术和之比来计算。一般情况下，可应用槽电动势相量星形图（双层绕组应包括上下层线圈边）进行计算，当各相量对于合成相量是对称分布时，绕组因数为

$$K_{dp}=\frac{1}{m_1}[m_0+2(m_1\cos\beta_1+m_2\cos\beta_2+\cdots+m_i\cos\beta_i+\cdots)] \tag{1.2-13}$$

式中，m_1 为相量总数；m_0 为与合成相量重合的相量数；m_i 为与合成相量成 β 角的相量数。

以 $\nu\beta$ 代替 β 代入式（1.2-13），可求出谐波绕组因数 $K_{dp\nu}$。这种绕组因数计算方法为通用方法，可适用于线圈排列较复杂的绕组型式，但计算较繁复，较适合用计算机进行计算。

3.2.5　单相交流绕组

单相交流绕组用于单相电机，一般由两个轴线在空间错开 90°电角度的绕组组成：一个称为工作绕组或主绕组，从电源输入功率，用以产生主磁场；另外一个称为起动绕组或辅助绕组。起动时，两个绕组的磁动势在气隙中建立合成旋转磁动势，起动电动机。根据不同的运行特性要求，有些单相电机的主、辅绕组占总槽数的比例分别为 2/3 和 1/3，有些单相电机则是两个绕组所占槽数相等。

单相绕组有单层、双层和正弦绕组等不同型式。单层绕组在小功率电机中使用较多，一般做成同心式绕组。其绕组展开图示例如图 1.2-8 所示。

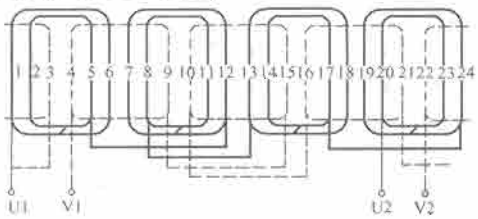


图 1.2-8　单相单层绕组展开图

$p=2$；$Q=24$

双层绕组一般采用链式绕组，当采用节距为 $2\tau/3$ 时，可以消除绕组磁动势中的三次谐波，有利于起动，其绕组展开图示例如图 1.2-9 所示。

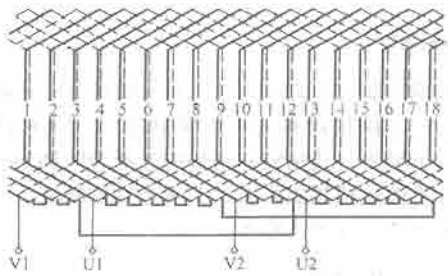


图 1.2-9　单相双层绕组展开图

$p=1$；$Q=18$

正弦绕组从线圈的形状来看，与单层同心式绕组相似，如图 1.2-10 所示。但定子每槽内导体数不等，其目的是使磁动势分布接近于正弦波形。图 1.2-10 中绘出了以相对值（取主绕组槽内导体最多的为 100%）来表示各槽导体的分布情况，其中实线为主绕组，虚线为辅助绕组。

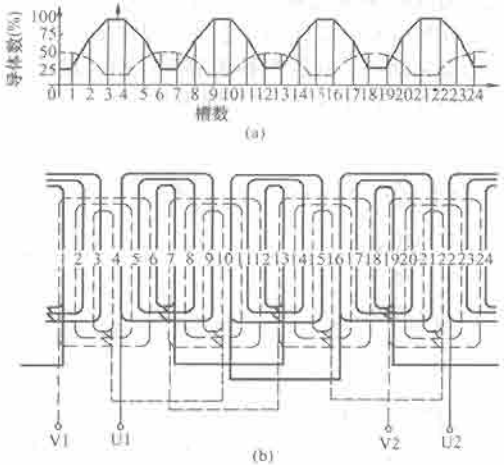


图 1.2-10　单相正弦绕组

(a) 各槽内导体分布；(b) 绕组接线图

$p=2$；$Q=24$

正弦绕组能显著地削弱高次谐波，从而改善电动机的运行性能，对控制电机，则可提高控制精度，但有些槽的槽满率较低，影响了铁心的利用率。为此，近年来出现了具有大小不同槽形的设计。

3.3　直流电枢绕组

参见第 4 篇直流电机。

3.4　短路绕组

感应电机的笼型转子绕组及同步电机的阻尼绕组一般自成闭合回路，统称为短路绕组。

感应电机笼型转子绕组由置于铁心槽中的导条及将导条短接的端环组成。导条形状有圆形、矩形、梯形、特殊形状以及双笼导条，主要根据电机起动性能的要求选定。常用的有铸铝笼及焊接铜（或铝）笼。随着变频技术的发展，特殊槽形和双笼导条日趋少用。

应该指出，为了避免谐波附加转矩和单向磁拉力，转子槽数的选择非常重要。同时为了改善起动性能和降低噪声，可采用导条偏斜 1～2 个定子槽距的斜槽转子。

同步电机的阻尼绕组结构与感应电机笼型绕组结构相似。阻尼绕组可对负序电流起阻尼作用，并可抑制同步电机的振荡，提高电机运行的可靠性。对于同步电动机，还可作为起动绕组使用。

3.5 磁极绕组

主磁极绕组流过直流电流建立励磁磁场，它按所需的励磁磁动势设计。隐极同步电机的励磁绕组为同心式分布绕组，嵌在转子槽中，其励磁磁动势的波形为阶梯形波。凸极同步电机和直流电机的磁极绕组为安装在磁极铁心上的集中绕组，其磁动势的波形为矩形。

4 气隙磁场及磁路

4.1 交流绕组磁动势

交流绕组建立的基波磁动势，在同步电机内是电枢反应磁动势；而在感应电机内，它的一个分量是产生空载气隙磁场的励磁磁动势，另一个分量用以补偿转子磁动势。

4.1.1 单相脉振磁动势

单相分布绕组中流过频率为 f 的交流电时，产生一个在空间呈阶梯形分布、轴线相对于绕组固定不动、大小随时间交变的脉振磁动势，其脉振频率等于绕组中的电流频率。该脉振磁动势在空间的分布可分解为基波及一系列高次谐波，其表达式为

$$\begin{aligned}F(\theta,t)&=\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\frac{N}{p}I\left(K_{dp}\cos p\theta+\sum\frac{1}{\nu}K_{dp\nu}\cos\nu p\theta\right)\sin\omega t\\&=\frac{\sqrt{2}}{\pi}\frac{NK_{dp}}{p}I[\sin(\omega t-p\theta)+\sin(\omega t+p\theta)+\\&\quad\sum\frac{\sqrt{2}}{\pi}\frac{NK_{dp\nu}}{\nu p}I[\sin(\omega t-\nu p\theta)+\sin(\omega t+\nu p\theta)]\end{aligned}\tag{1.2-14}$$

式中，N 为相绕组串联匝数；I 为相电流有效值；θ 为距离相绕组轴线的空间角度；ν 及 $K_{dp\nu}$ 为高次谐波的次数及其绕组因数；ω 为电流角频率，$\omega=2\pi f$。

由式（1.2-14）可知，任何一次脉振磁动势都是由振幅相等、旋转方向相反的两个旋转磁动势波合成的。

4.1.2 三相旋转磁动势

对称三相绕组流过三相对称电流时，其磁动势是三个在时间相位和空间相位都互相间隔 120°电角度的脉振磁动势合成的合成磁动势。其空间分布是一个旋转阶梯形波，如图 1.2-11 所示，以 A 相绕组轴线为坐标起始轴，三相绕组合成磁动势表达式为

$$\begin{aligned}F(\theta,t)=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\frac{NI}{p}\Big[&K_{dp}\sin(\omega t-p\theta)-\frac{1}{5}K_{dp5}\sin(\omega t+5p\theta)+\\&\frac{1}{7}K_{dp7}\sin(\omega t-7p\theta)-\cdots\Big]\end{aligned}\tag{1.2-15}$$

由式（1.2-15）可知，合成基波磁动势是一个正弦分布、波幅恒定的旋转磁动势。电流在时间相位上变化的电角度数，等于磁动势在空间移过的电角度数，其转向由超前相朝滞后相的方向旋转。当某相电流达最大值时，合成磁动势波幅就与该相绕组轴线重合。合成基波磁动势的极对数为 p，幅值为

$$F_1=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\frac{NK_{dp}}{p}I\tag{1.2-16}$$

其转速即为同步转速

$$n_s=\frac{60f}{p}\quad(\mathrm{r/min})\tag{1.2-17}$$

合成 ν 次谐波磁动势的极对数为 νp，幅值为

$$F_\nu=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\frac{NK_{dp\nu}}{\nu p}I\tag{1.2-18}$$

其同步转速为

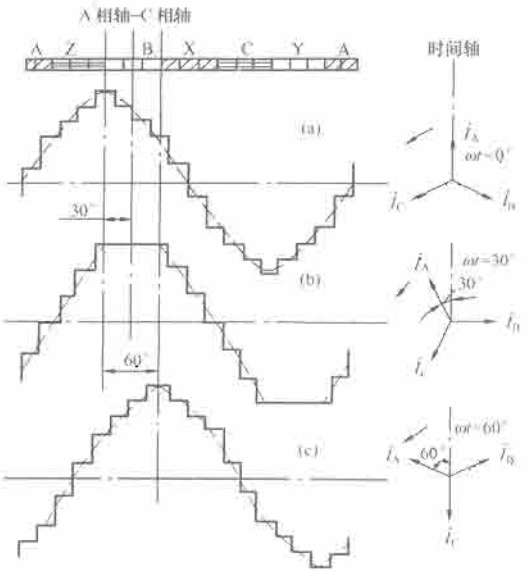


图 1.2-11 三相合成磁动势在三个瞬时的空间分布波形

$$n_{s\nu}=\frac{60f}{\nu p}=\frac{n_s}{\nu}\tag{1.2-19}$$

对于不同的三相绕组，其所含谐波磁动势的次数见表 1.2-5。

表 1.2-5 三相绕组谐波磁动势次数

相 带	谐波次数①	特 点
120°相带	$\nu=3k+1$	存在奇次及偶次谐波
60°相带整数槽	$\nu=6k+1$	存在 5 次及以上的奇次谐波
60°相带分数槽 $q=b+\frac{c}{d}$	d=奇数时 $\nu=\frac{1}{d}(6k+1)$ d=偶数时 $\nu=\frac{2}{d}(3k+1)$	存在奇次、偶次及分数次谐波
30°相带	$\nu=12k+1$②	存在 11 次及以上的奇次谐波

① $k=\pm1,\pm2,\pm3,\cdots$。

② 要求星-三角混合联结的星形联结部分和三角形联结部分的合成磁动势相等，空间互差 30°电角度。

4.2 空载气隙磁场

空载气隙磁场，在直流电机和同步电机中，由磁极绕组的直流励磁磁动势建立；而在感应电机中，则由定子绕组的交流磁动势建立。

4.2.1 凸极电机磁场曲线

直流电机主极极弧形状大致有：

1）均匀气隙。

2）偏心气隙（极弧与电枢外圆不同心，使气隙从主极中心向极尖处逐渐增大）。

3）极尖削角的均匀气隙（气隙从极弧两端约 1/6 长度处至极尖逐渐增大）。

后两种极弧形状可削弱由电枢反应所引起的气隙磁场畸变。直流电机空载磁场波形可用最大值为的矩形波表示，如图 1.2-12 所示。图中 b_δ 为计算极弧宽度，$b_\delta=a_\delta\tau$，其中 a_δ 为计算极弧系数，通常对有换向极电机，$a_\delta=0.6\sim0.75$，对无换向极电机，$a_\delta=0.65\sim0.8$。

凸极同步电机的磁极极弧形状大致有两种：

1）沿极弧范围内气隙是变化的，得到接近正弦波形的磁场分布，要求气隙按照 $\delta(x)=\delta/\cos(\pi x/\tau)$（$\delta$ 为磁极中心处气隙长度）变化。

2）气隙均匀，得到近似的矩形磁场分布。

上述两种磁场波形如图 1.2-13 所示。

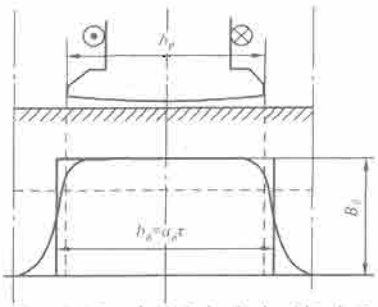


图 1.2-12　直流电机空载磁场波形

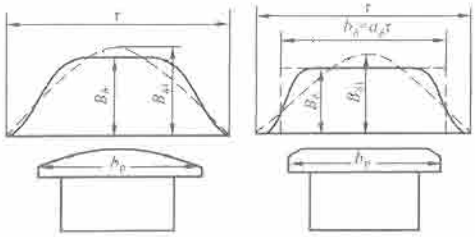


图 1.2-13　凸极同步电机空载磁场波形

表征空载磁场波形特征的有磁场基波幅值系数 K_{f1} 及磁通分布系数 K_Φ。K_{f1} 为基波磁通密度幅值 $B_{\delta1}$ 与气隙磁通密度最大值 B_δ 之比（见图 1.2-14），而 K_Φ 为气隙每极磁通 Φ 与其基波分量 Φ_1 之比（见图 1.2-15）。它们与极弧系数 b_p/τ、相对气隙长度 δ/τ 及气隙比 δ_m/δ 有关（δ_m 为极弧下极尖处的最大气隙长度）。通常取 $b_p/\tau=0.66\sim0.72$，$\delta_m/\delta=1.5\sim2.0$。当磁场曲线接近正弦波形时，$K_{f1}K_\Phi=1$，计算极弧系数 $a_\delta=(2/\pi)K_{f1}K_\Phi$。

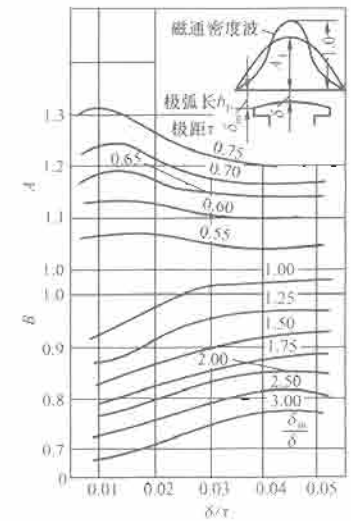


图 1.2-14　凸极磁场的基波幅值系数

$k_{f1}=A_1=A\times B$

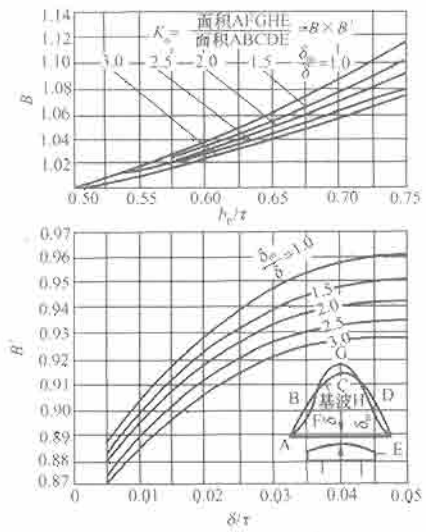


图 1.2-15　气隙磁通分布系数

4.2.2　均匀气隙磁场曲线

隐极同步电机空载磁场波形如图 1.2-16 所示。决定磁场波形的主要因素是实际嵌线槽数部分 2θ 与极距 τ 之比 γ，即 $\gamma=2\theta/\tau=1-b/\tau$。$\gamma$ 也可用槽数比来表示，即 $\gamma=Q/Q_t$，其中 Q 为转子实际开槽数，Q_t 为转子等分度数。如果把磁场波形近似视为梯形波，则隐极电机计算极弧系数

$$a_\delta=0.5(1+b/\tau)=1-0.5\gamma$$

其基波幅值系数

$$K_{f1}=(8/\pi^2)\sin(\pi\gamma/2)/\gamma$$

在感应电机中，气隙是均匀的，当铁心不饱和时，气隙磁场沿定子内圆的分布与每极下的励磁磁动势的分布波形基本一致，近似为正弦形。但在实际电机中，铁心有些饱和，因此，每极下的磁场分布呈平顶波形，如图 1.2-17 所示、图中 B_δ 为气隙磁通密度最大值。此平顶波可用一等效的矩形波去代替，矩形的底边长等于极距 τ，这表示假定气隙磁通密度沿一个极距内均匀分布，此时，每极下磁通表示为

$$\Phi=B_{av}\tau l'$$

式中，B_{av} 为气隙磁通密度平均值；l' 为铁心的有效长度。

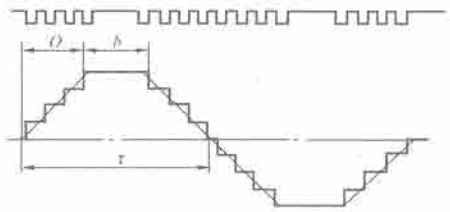


图 1.2-16　隐极同步电机空载磁场波形

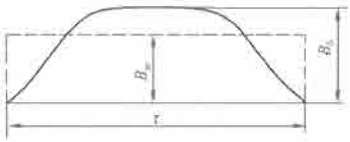


图 1.2-17　感应电机的空载磁场波形

感应电机的气隙磁场波幅系数 $F_s=B_\delta/B_{av}$，于是

$$B_\delta=F_sB_{av}=F_s\frac{\Phi}{\tau l'}$$

因此，通过 Φ 和 F_s 可确定气隙磁通密度最大值 B_δ。

显然，磁路越饱和，则气隙磁场的分布越扁平，F_s 越接近于 1；而当磁路不饱和时，磁场波形为正弦波形，此时 $F_s=\pi/2=1.57$，达最大值。对于低饱和的感应电机，F_s 可近似按 1.57 计算。

4.3　磁路计算

磁路计算是按给定的电机端电压求得所需的每极主磁通，进而求取磁路各部分磁通密度和磁位降，计算所需的磁动势、励磁电流以及空载特性。

磁路计算方法的依据是全电流定律 $F=\oint H\mathrm{d}l$，即所需的总磁动势可由磁场强度的线积分求得，通常取沿磁通密度最大的路径作为积分回路。实际计算是通过求各段磁路，例如气隙、齿、轭、极身等部位磁位降的总和 $2H_xl_x$ 代替积分，求得总磁动势。图 1.2-18 表示一凸极同步电机的磁路，其磁路可分为下列 5 段：空气隙、定子齿、定子轭、磁极、转子轭。

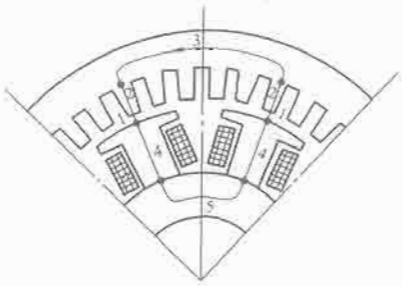


图 1.2-18 凸极同步电机的磁路

每极磁路中，空气隙的磁位降通常占较大的比例（约占 60%～85%或以上）。气隙的一边或两边有齿和槽，因此，实际的气隙磁通密度分布是不均匀的，实际气隙磁位降较假定气隙无齿槽时的大。它的影响用气隙系数 k_δ 来修正气隙长度。设齿宽为 t，槽口宽为 b_0，则气隙系数

$$k_\delta = \frac{t}{t-\gamma\delta} \tag{1.2-20}$$

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5+\frac{b_0}{\delta}}$$

（对开口槽）

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{4.4+0.75\left(\frac{b_0}{\delta}\right)}$$

（对半闭口槽或半开口槽）

径向通风沟使磁通通过气隙的轴向长度减小，实际的轴向长度为铁心有效长度

$$l' = l - k_v N_v b_v \tag{1.2-21}$$

$$k_v = \frac{\frac{b_v}{\delta}}{5+\frac{b_v}{\delta}}$$

式中，l 为铁心总长度；N_v 为通风沟数；b_v 为通风沟宽度。

若定子、转子均有通风沟，两者交错时应分别考虑；两者对齐且相等时，k_v 式中应以 $2b_v$ 代替 b_v 计算。

齿部磁路各处的齿宽 b_t 一般是变化的，不同截面处磁通密度及磁场强度不同，计算齿磁位降时，沿齿高分段越多，计算结果越准确。一般可计算齿的最窄、中间及最宽处的磁场强度 H_1、H_2、H_3，假定磁场强度沿齿高为抛物线分布，齿部平均磁场强度为 $H_{tav}=(H_1+4H_2+H_3)/6$。实际上常取距齿最窄处 1/3 齿高处的磁场强度作为 H_{tav}。若齿宽呈分段不连续变化时，则应分段计算。

沿轭部（即齿联轭）磁路的磁通密度分布是不均匀的，在磁极中心处为零，而在相邻磁极轴线之间的中心线处最大，另外磁通密度沿轭高方向分布也不均匀（见图 1.2-19）。它们的影响用磁路长度修正系数 ζ 修正。ζ 和轭高与极矩比值 h_y/τ、轭磁通密度及极数有关。如果不考虑磁通密度沿轭高的不均匀分布，ζ 的不饱和值为 $2/\pi$。

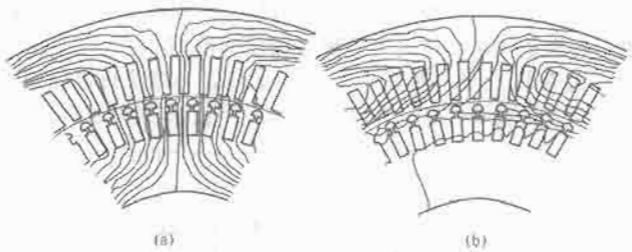


图 1.2-19 感应电机的磁场分布

(a) 空载；(b) 转子堵转

磁路各部分磁通密度及磁位降计算见表 1.2-6。各类电机的磁路各部分磁通密度值见表 1.2-7。

表 1.2-6 磁路各部分磁通密度及磁位降计算

部 位	磁路面积 (m^2)	磁通密度 (T)	磁场强度 (A/cm)	磁路计算长度 (cm)	磁位降 (A)	备 注
气隙	$A_\delta=\pi l'$	$B_\delta=\frac{1}{\alpha_\delta}\frac{\Phi}{A_\delta}$	$H_\delta=0.8B_\delta\times10^4$	$\delta'=k_\delta\delta$	$F_\delta=H_\delta\delta'$	
齿	$A_t=b_t l_{fe}\frac{Q}{2p}$	$B_t=\frac{1}{\alpha_\delta}\frac{\Phi}{A_t}$	H_t	h_t	$F_t=H_t h_t$	F_{ts}定子齿 F_{tr}转子齿 F_{ta}电枢齿
轭	$A_y=h_y l_{fe}$	$B_y=\frac{\Phi}{2A_y}$	H_y	h_y	$F_y=H_y l_y\xi$	F_{ys}定子轭 F_{yr}转子轭 F_{ya}电枢轭 F_{yf}机座轭
极身	$A_m=b_m l_{fe}$	$B_m=\frac{\sigma\Phi}{A_m}$	H_m	h_m	$F_m=H_m h_m$	

注 铁心净长 $l=K_{fe}(l-k_vN_vb_v)$，铁心叠压因数 $K_{fe}=0.92\sim0.95$，$l_{fe}=K_{fe}(l-N_vb_v)$；b_t、h_t—齿宽、齿高；b_m、h_m 及 l'_m—磁极宽、高及轴向净长；σ—磁极漏磁系数，对直流电机，$\sigma=1.15\sim1.2$；对凸极同步电机，$\sigma=1.2\sim1.3$。H_t、H_y、H_m 分别根据 B_t、B_y、B_m 值查相应铁心材料的磁化曲线求取。

表 1.2-7 磁路各部分磁通密度 单位：T

电机类型	凸极同步电机	隐极同步电机	感应电机	直流电机
定子或电枢齿	1.5～1.7	1.5～1.7	1.3～1.6	1.7～1.95
定子或电枢轭	1.1～1.4	1.3～1.5	1.1～1.5	1.0～1.6
转子齿		1.7～2.2	1.3～1.6	
转子轭	1～1.2（钢） 0.5～0.7（铸铁）	1.4～1.6	0.8～1.6	
极身	1.3～1.5			1.3～1.7
机座轭				0.95～1.3（铸钢或钢板） 1.1～1.5（钢板叠片）

注 气隙磁通密度见本章 2.1 节和 2.2 节。齿磁通密度对非平行齿系指靠近最窄处的 1/3 高处。

4.4　励磁磁动势与励磁电流

按不同电机的磁路结构，由各部分磁位降之和求取所需的每极励磁磁动势：

直流电机

$$F = F_\delta + F_{ts} + F_{ys} + F_m + F_{tc} + F_{yf} \quad (1.2\text{-}22)$$

凸极同步电机

$$F = F_\delta + F_{ts} + F_{ys} + F_m + F_{yr} + F_{\delta y} \quad (1.2\text{-}23)$$

隐极同步电机及感应电机

$$F = F_\delta + F_{ts} + F_{ys} + F_{tr} + F_{yr} \quad (1.2\text{-}24)$$

式中，F_{tc}为主极补偿齿磁位降；$F_{\delta y}$为磁极装配间隙的磁位降。

其余见表 1.2-6。

对直流励磁的电机，励磁绕组匝数为 N_1 时，空载励磁电流

$$I_1 = \frac{F}{N_1} \quad (A) \quad (1.2\text{-}25)$$

对感应电机，励磁电流

$$I_1 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{pF}{mNK_{dp}} \quad (A) \quad (1.2\text{-}26)$$

关于具有永磁材料的电机的磁路计算参见本卷第 5 篇。

5　电感与电抗

5.1　主电抗

多相交流绕组的每相主电抗由下式计算

$$X_m = \frac{4 f \mu_0}{\pi} \frac{m (NK_{dp})^2}{p} \frac{\tau l'}{K'_\delta \delta'} \quad (\Omega) \quad (1.2\text{-}27)$$

式中，K'_δ为电机磁路总磁位降与气隙磁位降之比。

对感应电机，主电抗即为励磁电抗；对同步电机，主电抗即为电枢反应电抗。

如果以 $X_{m0} = E/I_N$ 为基准，主电抗的标么值为

$$X_m^* = \frac{X_m}{X_0} = \frac{\sqrt{2}\mu_0 K_{dp} \tau}{\pi K'_\delta \delta'} \frac{A}{B_\delta} \quad (1.2\text{-}28)$$

5.2　漏磁通与漏电抗

漏磁通是绕组所产生的总磁通的一部分，它也能在绕组中产生感应电动势，该电动势频率与产生该磁通的电流频率相同，并通常用漏抗压降表示，因而每一漏电抗都与某一部分漏磁通相对应。漏磁通不参与能量转换，相应的漏电抗有槽、端部、齿冠漏电抗和谐波漏电抗。漏电抗可用下式计算

$$X_\sigma = 4\pi f \mu_0 \frac{N^2}{pq} l' \Sigma\lambda \quad (1.2\text{-}29)$$

式中，$\Sigma\lambda$ 为单位铁心有效长度的各部分比漏磁导之和。

以 U_N/I_N 为基准值漏电抗标么值为

$$X_\sigma^* = \frac{\sqrt{2}\pi\mu_0}{K_{dp} mq} \frac{A}{B_\delta} \Sigma\lambda \quad (1.2\text{-}30)$$

漏电抗与 A/B_δ 成正比。正确选择电磁负荷和通过调整电磁负荷的比值来使漏电抗值符合性能要求。例如，增加绕组匝数 N，使 A 增大而使 B_δ 降低，则漏电抗将增大；反之减少匝数，漏电抗将减小。另外改变各部分漏磁导 $\Sigma\lambda$ 也可改变漏电抗的大小。

槽漏电抗由横向穿过槽部的漏磁通引起，如图 1.2-20 所示。对图中所示的矩形槽，槽比漏磁导为

$$\lambda_s = \frac{h_0}{b_0} + \frac{2h_1}{b_0 + b} + \frac{h_2}{3b} \quad (1.2\text{-}31)$$

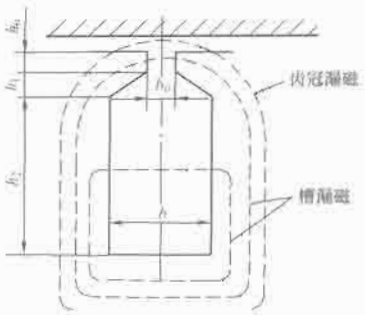


图 1.2-20　槽部漏磁

对双层短距绕组，由于某些槽上下层线圈边电流的相位不同而使槽漏磁导有所减小，其减小值与绕组节距有关。

槽漏电抗的大小取决于槽数和槽形几何尺寸，槽数少且槽形深而窄者，槽漏电抗大。当槽内每根导体沿槽高方向尺寸较大时，还应考虑集肤效应的影响，它使槽漏电抗减小。

端部漏电抗由端部漏磁通引起，如图 1.2-21 所示。对常用的双层叠绕组，端部比漏磁导

$$\lambda_e = 1.2K_{dp}^2 \frac{q}{l'}(d + 0.5 f_d) \quad (1.2\text{-}32)$$

端部漏电抗与绕组端部结构及尺寸有关，端部越长，和附近的磁性金属构件（如机座和端盖等）越靠近，则端部比漏磁导越大。

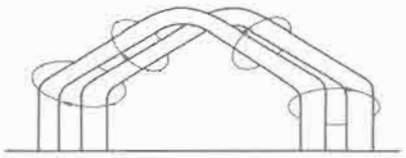


图 1.2-21　端部漏磁

齿冠漏电抗是由通过相邻齿冠闭合的漏磁通引起的，如图 1.2-20 所示。齿冠漏电抗随槽口宽度与气隙长度的比值增大而减小。对气隙较小的电机（如感应电机），可忽略齿冠漏电抗。

谐波漏电抗由气隙中高次谐波磁通引起。有时把谐波漏电抗划分为齿谐波漏电抗及相带谐波漏电抗。按绕组谐波分析求出各次谐波次数 ν 及相应的绕组因数 $K_{dp\nu}$，则谐波漏磁导为

$$\lambda_d = \left(\frac{mq\tau}{\pi^2 \delta' K_\delta}\right) \Sigma \left(\frac{K_{dp\nu}}{\nu}\right)^2 \quad (1.2\text{-}33)$$

谐波漏磁通是通过气隙的，故增大气隙可使谐波漏电抗减小。齿谐波漏电抗的大小与每极槽数有关，而与绕组节距无关；相带谐波漏电抗大小与槽数无关，但随绕组节距而变。

5.3　电抗对电机运行性能的影响

电抗对交流电机稳态运行性能的影响见表 1.2-8，对同步电机瞬态特性的影响参见第 2 篇。

直流电机电枢绕组漏磁通因换向过程中电流的变化而变化，在换向元件中感生电抗电动势，它阻止换向电流变化，对换向不利。与该漏磁通相应的漏磁导越小，则电抗电动势越小，能改善换向。

表 1.2-8　电抗对交流电机稳态运行性能的影响

电　抗	影响的参量或性能	影　响　情　况
同步电抗[1] $X_d = X_{ad} + X_\sigma$（对同步电机）	短路比 K_c 与静过载系数 K_M	$K_M \propto K_c \propto 1/X_d$，故 X_d 越小，静态运行稳定性越高
	电压变化率	X_d 越小，电压变化率越小
	线路充电容量	X_d 越小，允许的线路充电容量越大
	稳态短路电流	X_d 越小，稳态短路电流越大

续表

电抗	影响的参量或性能	影响情况
漏电抗 X_σ（对感应电机）	过载能力（最大转矩 T_{max}）	$T_{max} \propto 1/X_\sigma$，故 X_σ 越小，过载能力越大
	起动性能（起动转矩 T_{st} 及起动电流 I_{st}）	$T_{st} \propto I_{st} \propto 1/X_\sigma$，故 X_σ 越小，起动转矩越大，但起动电流也越大
	功率因数	X_σ 小，功率因数一般较高②

① 参见第2篇。

② 若调整电磁负荷比值使 X_σ 减小，这时 X_m 也减小，使励磁电流增大，则功率因数有可能降低。

6 损耗与效率

6.1 基本铁损耗

在铁心中主磁通交变引起磁滞及涡流损耗。常按下式计算基本铁损耗

$$P_{Fe} = Kp_{1/50}B^2\left(\frac{f}{50}\right)^{1.3}G_{Fe} \quad (W) \qquad (1.2\text{-}34)$$

式中，K 为考虑铁心加工、磁通密度分布不均匀等因素使铁损耗增加的修正系数；$p_{1/50}$ 为频率为50Hz，磁通密度为1T时铁心材料的单位损耗，W/kg；B 为铁心磁通密度，T；f 为磁通交变频率，Hz；G_{Fe} 为铁心质量，kg。

应分别计算定子或电枢铁心的齿、轭部铁损耗，然后相加。正常运行时，同步电机的磁极极身主磁通不变，异步电机转子内的磁通变化频率很低，基本铁损耗均可忽略。

6.2 绕组电阻损耗与电刷接触损耗

绕组电阻损耗是电流流过绕组电阻所产生的 I^2R 损耗（铜损耗）。按国家标准规定计算损耗时，绕组电阻应折算到与绕组绝缘等级相对应的基准工作温度。

对多相交流电机，应为各相绕组损耗之和，其电阻为直流电阻值；对直流电机，除电枢绕组的电阻损耗外，还应包括与之串联的换向极绕组及补偿绕组的电阻损耗。

对带励磁绕组的同步电机或直流电机，应计入励磁绕组的电阻损耗。

若电机有电刷与集电环或换向器时，还应计算电刷接触损耗。

6.3 杂散损耗

由定、转子绕组中电流产生的漏磁场及高次谐波磁场，以及由气隙磁导变化产生的气隙磁场变化而引起的损耗称为杂散损耗。

杂散损耗，按产生损耗有效部位，分为杂散铁损耗和杂散铜损耗；按产生时的工作状况，可分为空载和负载杂散损耗。空载杂散损耗基本上是杂散铁损耗，常与基本铁损耗一起包括在空载铁损耗中。

杂散铁损耗主要为表面损耗和脉振损耗。空载杂散铁损耗是因定子（或转子）开槽导致磁导变化引起气隙磁通脉动，在转子（或定子）表面上所产生的表面损耗和进入齿中磁通脉振所产生的脉振损耗。磁通脉动情况如图1.2-22所示。负载杂散铁损耗主要是由定子（或转子）负载电流所引起的磁动势谐波磁通，在转子（或定子）上产生的表面损耗和脉振损耗，还有由端部漏磁在金属构件中产生的涡流损耗和斜槽笼型转子导条间横向电流在叠片铁心中引起的损耗。

杂散铜损耗包括由槽漏磁通引起导体中电流集肤效应使绕组电阻值增大，以及导体由多股线并联时，因各股线所处位置不同，感生的漏磁电动势不同，以致在股线间产生环流而引起的损耗。对感应电机，还包括由定子谐波磁通在转子绕组中感应的谐波电流所产生的损耗，以及斜槽笼型转子因流动于导条间的横向电流而在导条中所产生的损耗。

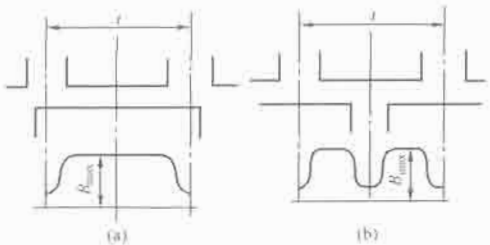


图 1.2-22 齿磁通的脉动

(a) 齿齿相对；(b) 齿槽相对

杂散铁损耗大致与引起损耗的谐波磁通密度的二次方成正比，因而空载杂散铁损耗随槽口宽度增大或气隙长度减小而增加，同时随磁场与产生损耗的部件间的相对运动速度的增大而增大，并与产生损耗的部件表面状况（材料及冲片厚度以及铁心表面毛刺等）有关。开口槽采用磁性槽楔可使开槽引起的磁导齿谐波磁通大为降低，因而大、中型交流电机常借以降低其空载杂散损耗。

负载杂散铁损耗大致与引起损耗的磁动势谐波磁通密度的二次方成正比，因而减小绕组磁动势谐波含量可降低负载杂散铁损耗。例如三相交流60°相带绕组可选用短距比 $\beta \approx 5/6$，以削弱较低次的5、7次谐波，或采用30°相带等谐波含量较少的绕组，以及增大气隙等。杂散铜损耗主要与槽深方向导体高度及分层数有关，大型同步电机的定子绕组采用换位是降低杂散铜损耗的重要措施。此外，感应电机的负载杂散损耗还与定、转子槽数配合（Q_s/Q_r）、笼型转子导条与铁心间接触电阻等因素有关，采用少槽一近槽配合（转子槽数少于定子槽数，但数值接近）及在铸铝笼型转子中加槽绝缘或其他增大导条与铁心间接触电阻的工艺措施，都是降低感应电机负载杂散损耗的有效措施。应该指出，影响杂散损耗的因素较多，很难正确计算，其测试也不易精确，往往是通过测定总损耗，然后从中减去所测定的各基本损耗之和来确定。

6.4 风摩损耗

风扇及通风系统损耗取决于风扇的型式及尺寸、通风系统结构以及冷却介质密度等。电机转子表面与冷却介质的摩擦损耗取决于转子直径、长度及圆周速度，约与转子直径的五次方、转速的三次方成正比。轴承损耗取决于轴承型式、承受的比压力、轴颈圆周速度及润滑情况。电刷摩擦损耗取决于电刷的型式、比压力、接触面积、集电环或换向器的圆周速度。风摩损耗一般情况下为上述各损耗之和。

6.5 效率

从输出功率 P_2 和各种损耗之和 $\sum P$ 求出效率

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} \qquad (1.2\text{-}35)$$

一般考核在额定输出功率 P_N 下的额定效率，但运行中也应注意到不同输出功率（0.5～1.0）P_N 下的效率。当电机运行在不变损耗（空载损耗及风摩损耗）与可变损耗（电阻损耗及负载杂散损耗）相等的负载时，电机运行效率最高。

对同一类电机，一般情况下，转速较高者效率较高，单机容量较大者效率较高。

7　结构安装型式和防护型式

7.1　结构安装型式

7.1.1　轴中心高

轴中心高是从电机成品底脚平面至轴中心线的距离，它包括制造厂供应的绝缘垫块厚度，但不包括电机安装时调整用垫块的厚度。

轴中心高应符合表 1.2-9 的规定。轴中心高公差及平行度公差应符合表 1.2-10 的规定。中心高公差适用于在公共底板上安装的电机。平行度公差是指电机两个轴伸端面中心高之差。

表 1.2-9　　轴 中 心 高　　单位：mm

36	40	45	50	56	63	71	80	90	100
112	132	160	180	200	225	250	280	315	355
400	450	500	560	630	710	800	900	1000	

7.1.2　结构及安装型式代号

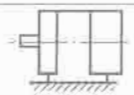
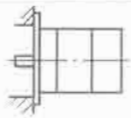
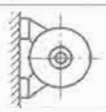
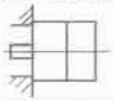
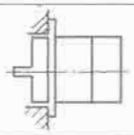
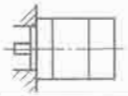
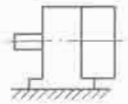
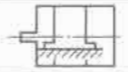
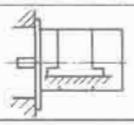
电机的结构及安装型式代号应符合 GB/T 997—2003《电机结构及安装型式（IM 代号）》的规定。代号分为两种，即规定 1 和规定 2。规定 1 适用于具有端盖式轴承和一个轴伸的电机，其代号由“国际安装”（International Mounting）的缩写字母“IM”、代表“卧式安装”的“B”和代表“立式安装”的“V”连同 1 位或 2 位阿拉伯数字组成，如 IMB35 或 IMV14 等。B 或 V 后面的阿拉伯数字代表不同的结构和安装特点。在 GB/T 997—2003 中明确规定了 14 种卧式安装代号和 17 种立式安装代号，见表 1.2-11 和表 1.2-12，表中 D 端为传动端，N 端为非传动端。规定 2 为全数字代号，适用于更广的电机型式，包括规定 1 涉及的电机型式。规定 2 的代号由 IM 连同 4 位阿拉伯数字组成，代表不同的结构和安装特点，详见 GB/T 997—2003。

表 1.2-10　　轴中心高及平行度公差　　单位：mm

中心高 H	中心高公差	平行度公差		
		$2.5H>l$	$12.5H\leqslant l\leqslant 4H$	$l>4H$
25～50	−0.4	0.2	0.3	0.4
>50～250	−0.5	0.25	0.4	0.5
>250～630	−1.0	0.5	0.75	1.0
>630～1000	−1.0	—	—	—

注　l 为电机轴的长度。

表 1.2-11　　卧 式 安 装 电 机 代 号

代　号	示　意　图	结构型式				安装型式（卧式）
		端盖式轴承数	底　脚	凸　缘	其他细节	
IM B3		2	有底脚	—	—	底脚安装，底脚在下
IM B5		2	—	有凸缘	端盖上带凸缘，凸缘有通孔，凸缘在 D 端	借 D 端凸缘面安装
IM B6		2	有底脚	—	—	借底安装，从 D 端看底脚在左边
IM B7		2	有底脚	—	—	借底脚安装，从 D 端看底脚在右边
IM B8		2	有底脚	—	—	借底脚安装，底脚在上
IM B9		1	—	—	D 端无端盖或轴承	借 D 端的机座面安装
IM B10		2	—	有凸缘	D 端有特殊的凸缘	借 D 端的凸缘面安装
IM B14		2	—	有凸缘	端盖有止口、无通孔，凸缘在 D 端	借 D 端的凸缘面安装
IM B15		1	有底脚	—	D 端无端盖或轴承，机座的 D 端用作附加安装	借底脚安装，底脚在下，用机座端面作附加安装
IM B20		2	有抬高的底脚	—	—	借底脚安装，底脚在下
IM B25		2	有抬高的底脚	有凸缘	端盖凸缘在 D 端，凸缘上有通孔	借底脚安装，底脚在下，用凸缘作附加安装

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

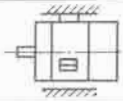
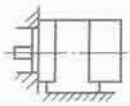
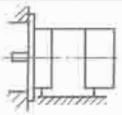
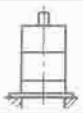
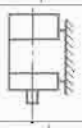
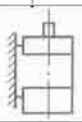
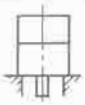
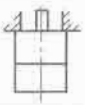
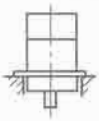
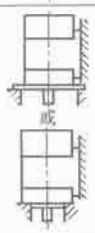
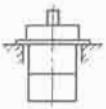
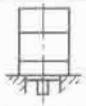
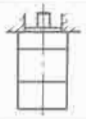
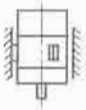
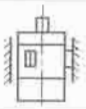
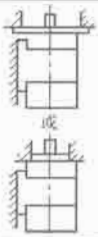
代号	示意图	结构型式				安装型式（卧式）
		端盖式轴承数	底脚	凸缘	其他细节	
IM B30		2	—	—	在端盖或机座上有 3 只或 4 只搭子	借搭子安装
IM B34		2	有底脚	有凸缘	端盖有止口，无通孔，凸缘在 D 端	借底脚安装，底脚在下，用 D 端的凸缘面作附加安装
IM B35		2	有底脚	有凸缘	端盖上带凸缘，凸缘有通孔，凸缘在 D 端	借底脚安装，底脚在下，用 D 端的凸缘面作附加安装

表 1.2-12　　立式安装电机的代号

代号	示意图	结构型式				安装型式（立式）
		端盖式轴承数	底脚	凸缘	其他细节	
IM V1		2	—	有凸缘	端盖上带凸缘，凸缘有通孔，凸缘在 D 端	借 D 端凸缘面安装，D 端向下
IM V2		2	—	有凸缘	端盖上带凸缘，凸缘有通孔，凸缘在 N 端	借 N 端凸缘面安装，D 端向上
IM V3		2	—	有凸缘	端盖上带凸缘，凸缘有通孔，凸缘在 D 端	借 D 端凸缘面安装，D 端向上
IM V4		2	—	有凸缘	端盖上带凸缘，凸缘上有通孔，凸缘在 N 端	借 N 端凸缘面安装，D 端向下
IM V5		2	有底脚	—	—	借底脚安装，D 端向下
IM V6		2	有底脚	—	—	借底脚安装，D 端向上
IM V8		1	—	—	D 端无端盖或轴承	借 D 端机座端面安装，D 端向下
IM V9		1	—	—	D 端无端盖或轴承	借 D 端机座端面安装，D 端向上
IM V10		2	—	有凸缘	D 端有特殊的凸缘	借 D 端凸缘面安装，D 端向下
IM V14		2	—	有凸缘	D 端有特殊的凸缘	借 D 端凸缘面安装，D 端向上
IM V15		2	有底脚	有凸缘	D 端端盖上带凸缘，凸缘有通孔或端盖上带止口，无通孔，凸缘在 D 端	借底脚安装，有 D 端的凸缘面作附加安装，D 端向下

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

代 号	示 意 图	结构型式				安装型式（卧式）
		端盖式轴承数	底 脚	凸 缘	其他细节	
IM V16		2	—	有凸缘	D端有特殊的凸缘	借N端凸缘面安装，D端向上
IM V18		2	—	有凸缘	端盖带止口，无通孔，凸缘在D端	借D端凸缘面安装，D端向下
IM V19		2	—	有凸缘	端盖上带止口，无通孔，凸缘在D端	借D端凸缘面安装，D端向上
IM V30		2	—	—	在端盖或机座上有3只或4只搭子	借搭子安装，D端向下
IM V31		2	—	—	在端盖或机座上有3只或4只搭子	借搭子安装，D端向上
IM V36	 或	2	有底脚	有凸缘	端盖上带凸缘，凸缘在D端有通孔或端盖上带止口，无通孔，凸缘在D端	借底脚安装，用D端凸缘面作附加安装，D端向上

7.2 防护型式代号

GB/T 4942.1—2001《旋转电机外壳防护分级（IP代码）》规定电机的防护类型有：①防止人体接触电机内带电或转动部分（光滑的旋转轴和类似部件除外）和防止固体异物进入电机内部的防护等级；②防止水进入电机内的防护等级。防护标志由字母IP和两个表示防护等级的表征数字组成，例如IP55，表征数字的意义见表1.2-13和表1.2-14。第一位表征数字表示外壳对人和壳内部件提供的防护等级，第二位表征数字表示由于外壳进水而引起影响的防护等级。

表1.2-13 第一位表征数字表示的防护等级

第一位表征数字	防护等级	
	简 述	含 义
0	无防护电机	无专门防护
1	防护大于50mm固体的电机	能防止大面积的人体（如手）偶然或意外地触及、接近壳内带电或转动部件（但不能防止故意接触） 能防止直径大于50mm的固体异物进入壳内
2	防护大于12mm固体的电机	能防止手指或长度不超过80mm的类似物体触及或接近壳内带电或转动部件 能防止直径大于12mm的固体异物进入壳内
3	防护大于2.5mm固体的电机	能防止直径大于2.5mm的工具或导线触及或接近壳内带电或转动部件 能防止直径大于2.5mm的固体异物进入壳内
4	防护大于1mm固体的电机	能防止直径或厚度大于1mm的导线或片条触及或接近壳内带电或转动部件 能防止直径大于1mm的固体异物进入壳内
5	防尘电机	能防止触及或接近壳内带电或转动部件 虽不能完全防止灰尘进入，但进尘量不足以影响电机的正常运转

表1.2-14 第二位表征数字所表示的防护等级

第二位表征数字	防护等级	
	简 述	含 义
0	无防护电机	无专门防护
1	防滴电机	垂直滴水应无有害影响
2	15°防滴电机	当电机从正常位置向任何方向倾斜至15°以内任一角度时，垂直滴水应无有害影响
3	防淋水电机	与铅垂线成60°范围内的淋水应无有害影响
4	防溅水电机	承受任何方向的溅水应无有害影响
5	防喷水电机	承受任何方向的喷水应无有害影响
6	防海浪电机	承受猛烈的海浪冲击或强烈喷水时，电机的进水量应不达到有害的程度
7	防浸水电机	当电机浸入规定压力的水中经规定时间后，电机的进水量应不达到有害的程度
8	持续潜水电机	电机在制造厂规定的条件下能长期潜水

8 分析电机的理论和方法概述

分析电机的机-电能量转换过程关键在于分析耦合磁场对电系统和机械系统的作用和反作用。分析电机时，一般来讲可分为下列四个步骤：

1）电机内部物理情况的分析。主要是分析空载和负载运行时电机内部的磁动势和磁场，并建立起物理模型。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2）列出电机的运动方程（即包括电路的电压方程和机械系统的转矩方程）。利用电磁感应定律和电磁力定律，求出各个绕组内感应电动势和作用在转子上的电磁转矩；再利用基尔霍夫定律、全电流定律、牛顿定律和能量守恒定律，列出各个绕组的电动势方程，以及电机的转矩平衡方程和功率平衡方程。这些方程统称为电机的运动方程。实质上是把物理模型变为数学模型。

电机的运动方程，除了可用上述传统的方法建立之外，亦可用汉密尔顿原理通过变分法来建立。

3）求解运动方程。根据列出的运动方程和求解问题的性质，即是线性还是非线性方程，是常系数还是含有周期性变化系数的变系数微分方程，问题的性质是稳态还是瞬态或动态等，恰当地选择运动方程的解法，求出其解析解或数值解。

4）研究电机的运行特性。运动方程解出后，即可确定电机的运行特性和一些主要的运行数据，例如电压变化率、转速变化率、效率、功率因数、过载能力、稳定性、允许过电流和过转矩倍数以及起动次数等。

在上述各步骤中，分析电机内部的磁场并建立求解电机的运动方程时，常用到下列方法和理论：

1）叠加原理。不计磁饱和时，可以用叠加原理来分析电机内部的各个磁场和气隙合成磁场，及其相应的感应电动势，然后将其效果叠加。对于时间或空间上呈周期性变化的量，使用谐波分析法将其分成基波和各次谐波分别处理，然后将其效果叠加。

考虑磁饱和时，常把非线性问题作近似处理，或者根据磁路性质的不同，把主磁通和漏磁通分开处理，再把具有非线性性质的主磁路作线性化处理。

2）归算。在交流电机中，由于绕组的匝数不等、相数不等、频率不同而引起困难时，常常用到归算法（从广义上来看，归算是一种坐标变换）。归算时要求满足特定的约束，例如磁动势守恒、功率守恒、磁场储能守恒等，以满足“等效”的要求。

3）等效电路和相量图。在分析交流电机的稳态和瞬态运行时，常常用到等效电路，为了观察时间上的相位关系和时-空关系，常常画出有关的相量图和时-空相量图。

4）坐标变换。在分析交、直流电机的瞬态问题，交流电机的不对称运行，凸极电机（直流电机、凸极同步电机）问题，以及感应电机的矢量控制问题时，常常用到坐标变换，以使电机的阻抗矩阵对角线化和常数化，使运动方程求解简化。不同的坐标变换事实上分别构成了分析凸极电机的双反应理论、单相电机的双旋转磁场理论、不对称运行时的对称分量法以及克朗的“统一电机理论”的基础。

常用的坐标变换有对称分量变换，d、q、0 变换和 α、β、0 变换三种。

①对称分量变换。这种变换是一种复变换，变换的结果是把一组随时间按正弦规律变化的不对称电压（电流）用三组对称的新变量（对称分量）替代，使原来的三相不对称电压（电流）分解为三组对称的电压（电流）。以电流为例，其变换关系如下

$$\begin{bmatrix} I_+ \\ I_- \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \tag{1.2-36}$$

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

式中，I_+、I_-、I_0 为电流的正序、负序和零序分量；I_A、I_B、I_C 为以相量表示的 A 相、B 相、C 相电流。

若被变换的量为 A、B、C 三相电压（电流或磁链）的瞬时值，则变换后的三个新变量即为实数轴与 A 相轴线重合时的电压（电流或磁链）综合矢量、该综合矢量的共轭复量和零轴分量。

②d、q、0 变换。这种变换是一种实变换，它把三相绕组固定轴线上的电流、电压变换到随转子一起旋转的 d 轴和 q 轴上。d 轴和 q 轴互相垂直，0 轴为一孤立系统。若 d 轴相对 A 相轴线的位置角为 θ，逆转向 90°电角度定义为 q 轴，则以电流为例，其变换关系为

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta-120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \tag{1.2-37}$$

$$\theta = \omega t + \theta_0$$

式中，i_d、i_q、i_0 为直轴、交轴和零轴电流；i_A、i_B、i_C 为 A 相、B 相和 C 相电流；ω 为转子电角速度；θ_0 为 d 轴在 $t=0$ 时的初始位置角。

③α、β、0 变换。α、β、0 坐标系是一个两相坐标系，其中 α 轴和 β 轴互相垂直，0 轴为一孤立系统，与 d、q、0 坐标系中的零轴相同。所以 A、B、C→α、β、0 之间的变换相当于三相绕组到两相绕组之间的坐标变换。若 α 轴与 A 相轴线重合，β 轴超前 α 轴 90°电角度，则以电流为例，其变换关系为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \tag{1.2-38}$$

式中，i_α、i_β、i_0 为 α 相、β 相和零轴电流。

5）电磁场分析。当磁路概念和相应的计算不能准确反映电机内部磁场情况，从而影响参数和运行特性计算的精度时，例如分析汽轮发电机的端部漏磁场和具有实心转子的交流电机等，就必须采用电磁场的理论来分析。因为利用解析法来分析电磁场具有一定局限性。近年来，由于计算技术的发展，可以对于特定的电机，根据边界形状和部件所用材料，把定子、转子、气隙等不同区域分成许多网格，然后把电磁场方程离散化，再用计算机逐次渐近地算出各点的磁场值，这样就可以较准确地得到考虑饱和，定、转子开槽等一系列因素时，整个电机内部磁场的分布。

6）机电能量转换体系。这种体系的特点是，把电机作为机电系统的一种，从电磁场理论出发导出其参数，从汉密尔顿原理和拉格朗日方程出发建立运动方程，用统一的方法来研究各种电机的电动势、转矩和进行能量转换的条件和机制，利用统一的方法（坐标变换、框图和传递函数、状态方程等）来分析各种电机的稳态和瞬态性能，以及电机和系统的联系，从而使整个电机理论建立在一个比较严密和便于利用电子计算机来求解的基础上。

计算机由于其突出的快速计算功能、存储功能以及逻辑判断功能，在电机设计中得到了广泛应用，使传统的电机设计方法发生了深刻变化。有关内容详见本篇第 3 章。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第3章　电机的现代设计方法

1　电机设计和制造中计算机的应用

1.1　概述

电机产品在积累了几十年的生产技术经验后，产品结构大多已经典型化，设计方法和以经验数据为依据的手工计算程序也已趋于成熟。但手工计算程序需花费大量的人力和时间，众多的经验数据更难以保证较高的计算精度，烦琐的计算公式使人们只能尽可能地简化数学模型，设计计算完成后的工程图样的手工绘制更是一项细致而繁重的工作。随着近代生产技术和科学研究的进一步发展，对电机产品的设计和制造提出了更高的要求。人们希望电机产品具备更高的技术经济指标，更优良的技术性能，以更少的材料和能源消耗，得到更加可靠、优良的质量。

从20世纪50年代开始，人们尝试在电机产品设计中应用电子计算机。随着电子计算机的迅速发展，特别是小型和微型计算机的迅速普及和应用，采用计算机进行电机产品设计或其他的一些机电产品的设计已成为机电行业中的一种必然趋势。一门新兴的学科——计算机辅助设计（Computer Aided Design，CAD）和计算机辅助制造（Computer Aided Manufacturing，CAM）已经形成，并日益完善，它越来越受到人们的重视。

所谓的CAD/CAM技术，是指技术人员和组织产品制造的工艺设计人员在CAD和CAM系统的辅助下，根据产品的设计和制造程序进行设计和制造的一项新技术，是人的智慧和创造力与计算机系统功能的巧妙结合。设计人员通过人-机交互操作的方式、进行产品设计构思和论证；进行产品总体设计，零部件设计；对有关零件的强度、刚度、热、电、磁进行分析计算；输出零部件加工信息（如工程图纸、数控加工信息等）；编制技术文件和报告（如数据库等）。而工艺设计人员则可根据CAD过程提供的信息和CAM系统的功能，进行工艺过程设计、工装设计、数控编程、作业计划安排、质量控制等一系列用计算机辅助进行的工作。计算机集成制造系统是CAD/CAM的进一步发展，这是一种全方位、总体高效益和高柔性的智能化制造系统，是未来制造业的发展方向。

CAD/CAM技术属于高科技范畴，涉及许多学科领域的知识，如计算机科学与工程、计算数学、现代设计方法学、人机工程、计算机图形学、微电子技术以及具体应用工程领域的专业知识等。CAD/CAM技术的应用和发展正在引起一场深刻的产品设计与制造的技术革命，并对产品结构、产业结构、管理结构、生产方式以及人才知识结构等产生重大影响。当今，CAD/CAM技术及其应用水平已成为衡量一个国家科技现代化和工业现代化水平的重要标志之一。

1.2　电机计算机辅助设计的内容与发展简况

早在20世纪50年代，就有人开始在电机设计中应用电子计算机。计算机在电机设计中的应用经历了从简单到复杂的三个阶段，这就是从“校核设计”到“综合设计”，最后进入“优化设计”。

所谓“校核设计”，就是该设计程序是按设计人员预先估计的若干设计参量，依一定程序步骤来确定产品运行性能的计算值。如计算结果不符合要求，则人工将一些输入量加以改变，再重新校算之。“校核计算”相当于以计算机演算来代替手算。

“综合计算”是根据已知的性能要求，决定电机各设计参数的程序。它与“校核设计”的区别在于：“综合设计”的目的是在规定的产品性能和技术条件下，使计算机主动选择适当的技术参数和结构尺寸，从而得出一个或一批可行方案。“综合设计”实质上就是不依赖人工而自动修改方案，并重复校核计算，直至最终得到符合要求的方案为止。习惯上称之为“循环计算”的电机设计程序是“综合设计”程序中最常见的形式，它能对一些自变量，如D_i、L、Z、J、B等，按规定步长进行多重循环计算，从而算出一大批方案，经比较后，由人工选出较优方案。

“优化设计”始于20世纪60年代初期，它是让计算机直接找出最优设计方案，而中间计算的比较方案个数尽可能少的一种程序。概括地说，“优化设计”的程序主要内容有：第一，是将实际设计问题抽象成为最优化的数学模型；第二，是选择最优化的计算方法，使用电子计算机求解数学模型，得出最优的（而不单是可行的）设计方案。

国外电机的计算机辅助设计始于20世纪50年代初期。到60年代，一些国家已较普遍地在电机设计中采用计算机辅助设计；同时，随着优化数学方法的发展，在电机设计中也开始了优化设计的尝试。从20世纪60年代开始，人们利用各种优化数学方法，如梯度法、随机搜索法、各种罚函数法、最小p次幂法及其他数学规划方法等，对异步电机、同步电机、变压器及各种微特电机等进行了优化设计，发表了许多这方面的文章，从而不断推动着电机优化设计的发展。从70年代开始，国外已有不少优化设计程序应用于生产。近10年来，随着自动描图机、自动绘图机配合计算机的自动设计，已使整个电机设计进入了完全自动化的新阶段。

国内电机的计算机辅助设计始于20世纪60年代，当时有少数单位编制了电机设计的“校核程序”。70年代起，有单位编制了有开槽计算的初级“综合设计”。而“优化设计”的工作则是从70年代后期开始的。从此，国内在将优化方法应用于电机新系列产品设计方面取得了一定的进展。但是，多数工厂采用的仍是“校核程序”，依靠人工修改输入参数和凭经验选择较优方案。而“优化设计”方法主要是在高等院校和研究所在研究使用。总之，国内对电机的计算机辅助设计的研究开发显得力量分散，尚未出现有影响的计算机辅助设计软件产品。与国外的计算机辅助电机设计自动化相比，我们还有不少差距。

目前，随着计算机和计算技术的不断发展，电机的计算机辅助设计仍有许多问题需要不断完善和解决。

首先，由于传统的设计方法是以半经验为依据的，公

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式的精度大多与20世纪40年代的试验技术和人工计算的工作量相适应。现在用计算机辅助设计，速度快，精度也高，所以，必须进一步科学地研究和分析原有的电机设计方法，改进计算公式。在电机设计中，要求建立更加严格、更加精确和更符合电机实际的数学模型以及求解途径。

其次，过去电机设计着重于电磁计算，而对通风计算、热计算、机械计算以及振动、噪声计算等，由于其工作量太大，往往只计算其中的某些部分，或用经验估算，有时甚至不计算。现在有了计算机辅助设计，就可以扩大计算范围，对电机设计的其他各个部分进行计算，并进行整体优化。当然，随着现代优化理论的不断发展，对目前在电机优化设计中往往只能找到局部而不是全局的最优解问题，必须进一步完善优化设计方法，提出更加完善的优化设计数学模型及更有效的优化算法。

此外，还要建立一个包括制造、试验和管理在内的系统和完整的信息数据库，为设计人员提供明确和有效的数据资料，以及建立一个图形处理系统，把电磁计算后的定、转子冲片和各种曲线，结构计算后的电机各零部件及整机均以标准的零件图和装配图绘出，然后与计算机辅助制造、管理结合，从而把计算机辅助设计、制造和管理连成一体，形成一个完整的电机自动设计、制造、管理集成系统。

1.3 CAD/CAM在电机工程中的应用

CAD/CAM在电机工程中的应用主要有以下几个方面：

1）计算机辅助电机设计。这是利用计算机帮助人们设计出最佳的电机，是CAD/CAM技术在电机工程中的一个重要应用，下面将对此作专门的详细介绍。

2）计算机辅助电机工程图的绘制。计算机绘图在电机设计、电机特性的计算机仿真、实验数值处理和电磁场计算的前后置处理等方面都得到了应用。这些应用，使电机的计算机辅助设计、制造和测试系统更紧密地联系在一起，从而提高了电机设计的效率和质量，设计出结构更合理、性能更好的产品。目前，计算机辅助电机工程绘图已在大多数电机制造厂、研究所得到了广泛的应用，大大减轻了工厂技术人员的工程绘图的工作量。

3）计算机辅助电机电磁场、温度场和应力场的计算。过去，电机中场的求解只限于应用解析法和图解法。这些方法的应用，一般限制在边界条件简单而媒质为线性的场合。计算机和计算技术的发展为电机中复杂的场问题数值解提供了条件，从而可以将现代数值解中的差分法、有限元法和边界元法等方法，在利用计算机技术的基础上，去求解电机中的各种线性和非线性的稳定场或瞬变场的问题，并获得较满意的结果。电机场的数值解法的应用为更精确的计算机辅助设计创造了条件。

4）电机的计算机仿真。所谓电机计算机仿真，就是先将电机或包括其控制系统用一个恰当的数学模型描述，再将数学模型在计算机上求解。通过计算机仿真，可以对尚未投入生产和运行的电机及其系统进行静态或动态运行状况的仿真分析。

5）计算机辅助电机制造。它包括电机制造中计算机辅助数控机床加工程序的编制，计算机辅助制造工艺过程的设计，计算机辅助检测与试验以及计算机集成制造系统等。

2 电机电磁场的数值计算方法

随着永磁材料、电力电子技术、计算机技术的发展和应用，结构特殊的新颖电机不断出现。当进行新结构电机设计时，为了提高计算的准确程度，已不能简单照搬传统电机的简化设计公式与数据，而需要从电磁场理论入手，进行电机电磁场的计算与分析。例如永磁电机磁极结构有表面式和内置式之分，内置式中又有径向式、切向式或混合式等，各种磁极结构（尤其是内置式）产生的气隙磁场和对应的漏磁系数很难用近似的一维场计算获得，需要根据具体的结构通过磁场计算确定；开关磁阻电机属于双凸极结构，气隙磁导变化复杂，如果考虑铁心磁饱和因素，其绕组磁链以及电感参数的确定也需要借助磁场的计算；轴向磁场电机和横向磁场电机的磁场分布情况更为复杂，其准确分析需借助三维场计算。

电磁场的经典描述是麦克斯韦方程组，麦克斯韦方程和电磁性能关系式成为分析电机中一切电磁过程的理论根据。理论上，描述不同结构电机的电磁场方程是相同的，但是，电机电磁场方程的求解有相当的难度，其主要原因如下：

1）电磁场方程式本身复杂。麦克斯韦方程组有积分和微分两种形式，但是其求解都不简单。

2）电机内部有多种不同材料。电机内一般有铜、铁乃至永磁体等，由于这些材料的导磁性能不同，相应区域的电磁场方程的磁导率也不同，增加了求解的复杂性。

3）电机电磁场求解区域的几何形状复杂。槽形区域、主磁极区域、铁心区域等不同材料构成形状各异的电机内部区域，造成求解困难。

4）铁磁材料存在磁饱和现象。铁磁材料的磁导率是变化的，相应的电磁场方程为非线性方程，难以获得解析解。

由于电机内部存在多种复杂因素，比较完整的电机电磁场的分析计算只有借助计算机通过数值解法才能获得。目前，电机电磁场数值分析方法中应用最广泛的是有限单元法（简称有限元法），其特点如下：

① 能计算具有多种媒质区域内的电磁场。

② 能精确地逼近复杂的几何边界。

③ 能很好地处理非线性问题。

④ 能精确地描述场源的分布。

⑤ 已形成一套比较合理和成熟的算法。

以上特点表明有限元法具有通用性强、计算精度高的优点，能够适应结构复杂的电机电磁场的计算要求，显示了很强的生命力，成为当前电机电磁场数值分析的主导方法。

2.1 边值问题和条件变分问题

积分形式和微分形式的麦克斯韦方程组所反映的物理本质是一致的。有限元法是基于偏微分方程的方法。微分方程要获得唯一解，必须给定相应的条件，称为定解条件。微分方程和定解条件作为一个整体，称为定解问题。对于电机恒定电磁场问题，定解条件就是边界条件，边界条件表达场的边界所处的物理情况，这又被称为边值问题。

边值问题给定的条件通常有三种情况：

1）边界上的物理条件规定了物理量 u 在边界 Γ 上的值

$$u|_{\Gamma} = f_1(\Gamma) \tag{1.3-1}$$

这称为第一类边界条件。当物理量在边界上的值为零时，称为第一类齐次边界条件。与此相对应的边值问题，称为狄里赫利问题。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2）边界上的物理条件规定了物理量 u 的法向微商在边界上的值

$$\left.\frac{\partial u}{\partial n}\right|_{\Gamma}=f_2(\Gamma) \tag{1.3-2}$$

这称为第二类边界条件。当物理量的法向微商为零时，称为第二类齐次边界条件。与第二类边界条件相对应的边值问题，称为牛曼问题。

3）边界上的物理条件规定了物理量 u 及其法向微商在边界上的某一线性关系

$$\left.\left(\alpha u+\beta\frac{\partial u}{\partial n}\right)\right|_{\Gamma}=f_3(\Gamma) \tag{1.3-3}$$

式中，α、β 为常数，称为第三类边界条件。与此相对应的边值问题，称为洛平问题。

边界条件的确定对电机电磁场计算非常重要。常选择两种典型的情况作为边界条件，即边界线与磁力线重合，或边界线与磁力线处处正交。例如，铁的磁导率远远大于空气，常将铁和空气的交界处作为边界，当区域内是铁，区域外是空气，则该边界线与磁力线重合；当铁在外，空气在内，则磁力线与边界正交。另外，电机电磁场常具有周期性，为了缩小求解区域，通常将周期性条件作为边界条件。如选取一对极的范围作为求解区域，达到减少计算量、提高计算速度的目的。

电机电磁场的分析一般采用位函数表示，位函数比场量本身更容易建立边界条件。位函数包括磁矢量位 $\boldsymbol{A}$ 和磁标量位 Φ，有源（电流）区域或无源区域都可以用矢量位求解，标量位适用于无电流区域。对于二维电磁场，矢量位只有一个分量，待求量个数与标量位相同，其微分方程的形式具有普适性，而且使用矢量位可以很方便地绘出磁力线分布并求出磁通，目前电机的二维电磁场计算大都采用矢量位。

电机中分析最多的是垂直于电机轴的平行平面场，这时电流密度和矢量位只有 z 轴方向的分量。对于稳态情况，平面场域 Ω 上的电磁场问题可表示成边值问题

$$\left.\begin{aligned}&\Omega:\frac{\partial}{\partial x}\left[\nu\frac{\partial A}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\nu\frac{\partial A}{\partial y}\right]=-J_z\\&\Gamma_1:A=A_0\\&\Gamma_2:\nu\frac{\partial A}{\partial n}=-H_t\end{aligned}\right\} \tag{1.3-4}$$

式中，ν 为磁阻率，$\nu=1/\mu$，μ 为磁导率；A 为矢量位，因为 $\boldsymbol{A}$ 只有 z 轴分量，故可写成标量形式；J_z 为源电流密度；H_t 为磁场强度的切向分量；Γ_1 为第一类边界；Γ_2 为第二类边界。

以图 1.3-1 所示的一台 4 极 12 槽永磁无刷电机的二维磁场求解区域为例说明边界条件的确定。对于定子铁心外圆 AB 和转子铁心内圆 CD 两条圆弧边界，因为铁心的磁导率远大于边界外的空气，使得穿过边界的磁通量很小，因此认为磁力线将与边界平行。用矢量磁位计算时，其边界上的矢磁位值为常数，即第一类边界条件。通常取矢磁位值为零，则成为第一类齐次边界条件。如果仅计算永磁磁场，对于直线 AD 和 BC 两条边界，由于处于极间位置，磁力线将垂直通过，即在这两条边界上，磁场强度的切向分量等于零。用矢磁位计算时，将得到第二类齐次边界条件。如果计算负载磁场，直线 AD 和 BC 则为整周期边界。

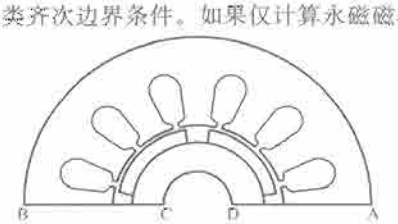


图 1.3-1　永磁无刷电机磁场求解区域

有限元法不是直接求解式（1.3-4）所描述的边值问题，而是依据边值问题在一定条件下等价于泛函的条件变分问题这一数学原理，首先将边值问题转换为条件变分问题，然后再进行数值求解。经典的函数概念是指两个数集之间所建立的一种对应关系，泛函则被赋予了更为一般的意义，通常是两个任意集合之间的某种对应关系。相应于普通函数的微分，泛函中则称为变分。边界条件是变分问题的约束条件，于是形成条件变分。

对于式（1.3-4）的边值问题，有限元法是将其等价为条件变分问题

$$\left.\begin{aligned}W(A)=&\iint_{\Omega}\left\{\frac{\nu}{2}\left[\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2\right]-\right.\\&\left.J_zA\right\}\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\int_{\Gamma_2}H_tA\mathrm{d}l=\min\\&\Gamma_1:A=A_0\end{aligned}\right\} \tag{1.3-5}$$

上式中矢量磁位 $\boldsymbol{A}$ 是坐标 (x,y) 的函数，W 常称为能量泛函，是 $\boldsymbol{A}$ 的函数。能量泛函 $W(A)$ 的极值问题用条件变分形式来表达，泛函的增量称为变分，类似于普通函数的微分，对应矢量磁位的增量 δA，能量泛函的变分

$$\delta W=\iint_{\Omega}\left\{\nu\left[\frac{\partial A}{\partial x}\delta\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)+\frac{\partial A}{\partial y}\delta\left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)\right]-J_z\delta A\right\}\mathrm{d}x\mathrm{d}y+$$

$$\int_{\Gamma_2}H_t\delta A\mathrm{d}l=0 \tag{1.3-6}$$

在边值问题转换成条件变分问题以后，有限元法的处理过程是，将方程中连续函数 A 所在的封闭场域划分成有限个小区域，称为单元；用选定的每个单元中的近似函数替代原来的连续函数，即每个单元内的磁位值可由该单元的节点上的磁位值通过近似函数（称为插值函数）求得。这样，原来场域内连续磁位函数的求解转变为各个单元节点上磁位值的求解，这一过程称为离散化；由此将形成一个大型的代数方程组，通过计算机采取适当的解法即可求得各单元节点上的磁位值。虽然离散化是对原连续函数的一种近似，只要剖分单元足够小，并且几何形状合理（对于三角形单元，等边三角形最佳），最后得到的磁位值将具有满意的精度。综上所述，有限元法求解的基本过程是：区域剖分、构造插值函数、变分问题离散化、形成总体方程、方程求解。

2.2　剖分插值

二维磁场有限元剖分单元通常为三角形单元，单元内部的矢量磁位由单元节点矢量磁位通过线性插值获得。单元插值函数

$$\boldsymbol{A}=N_i\boldsymbol{A}_i+N_j\boldsymbol{A}_j+N_m\boldsymbol{A}_m \tag{1.3-7}$$

对于图 1.3-2 所示的三角形单元，三个节点 i、j、m 按

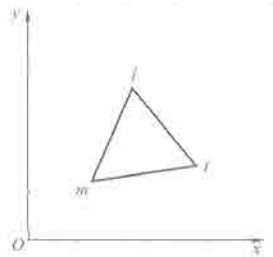


图 1.3-2　三角形单元示意图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

逆时针方向编号。此时

$$N_h = \frac{1}{2\Delta}(a_h + b_h x + c_h y) \quad h = i,j,m \tag{1.3-8}$$

式中

$$\begin{cases} a_i = x_j y_m - x_m y_j & a_j = x_m y_i - x_i y_m & a_m = x_i y_j - x_j y_i \\ b_i = y_j - y_m & b_j = y_m - y_i & b_m = y_i - y_j \\ c_i = x_m - x_j & c_j = x_i - x_m & c_m = x_j - x_i \end{cases} \tag{1.3-9}$$

Δ 为三角形单元的面积。

$$\Delta = \frac{1}{2}\begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{vmatrix} = \frac{1}{2}(b_i c_j - b_j c_i) \tag{1.3-10}$$

由于 Δ、a_h、b_h、c_h 都是仅与三角形单元的三个节点坐标有关，故称 N_h 为形状函数。

2.3 条件变分问题离散化

计算单元能量函数对三个节点磁位的一阶偏导数。单元能量函数为

$$\begin{aligned} W_e(\boldsymbol{A}_i,\boldsymbol{A}_j,\boldsymbol{A}_m) = \iint_{\Delta}\Big\{ & \frac{\nu}{8\Delta^2}\left[(b_i\boldsymbol{A}_i + b_j\boldsymbol{A}_j + b_m\boldsymbol{A}_m)^2 + \right. \\ & \left.(c_i\boldsymbol{A}_i + c_j\boldsymbol{A}_j + c_m\boldsymbol{A}_m)^2\right] - \\ & \frac{J}{2\Delta}\left[(a_i + b_i x + c_i y)\boldsymbol{A}_i + (a_j + b_j x + c_j y)\boldsymbol{A}_j + \right. \\ & \left.(a_m + b_m x + c_m y)\boldsymbol{A}_m\right]\Big\}\mathrm{d}x\mathrm{d}y \end{aligned} \tag{1.3-11}$$

上式积分后，对单元节点磁位求偏导数

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial W_e}{\partial A_i} \\ \dfrac{\partial W_e}{\partial A_j} \\ \dfrac{\partial W_e}{\partial A_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} & k_{im} \\ k_{ji} & k_{jj} & k_{jm} \\ k_{mi} & k_{mj} & k_{mm} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A_i \\ A_j \\ A_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p_i \\ p_j \\ p_m \end{bmatrix} \tag{1.3-12}$$

式中，单元系数矩阵主对角元素

$$k_{hh} = \frac{\nu}{4\Delta}(b_h^2 + c_h^2) \quad h = i,j,m \tag{1.3-13}$$

非主对角元素

$$k_{hl} = k_{lh} = \frac{\nu}{4\Delta}(b_h b_l + c_l c_h) \quad h = i,j,m, l = i,j,m, h \neq l \tag{1.3-14}$$

右端向量

$$p_h = \frac{J\Delta}{3} \quad h = i,j,m \tag{1.3-15}$$

2.4 总体合成

将整个区域中各单元的能量函数对同一节点磁位的一阶偏导数加在一起，并根据极值原理令其为零，得线性代数方程组为

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} \tag{1.3-16}$$

考虑边界条件，方程组需作修改。若三角形单元的一条边落在第二类边界上，其线积分的值还需叠加到相应的右端向量中。设该边的两端点为 j、m，则单元分析中右端项应为

$$\left.\begin{aligned} p_i &= \frac{J_z\Delta}{3} \\ p_j &= \frac{J_z\Delta}{3} - \frac{H_t l_{jm}}{2} \\ p_m &= \frac{J_z\Delta}{3} - \frac{H_t l_{jm}}{2} \end{aligned}\right\} \tag{1.3-17}$$

式中，l_{jm} 为三角形单元中落在第二边界上的边 j_m 的长度。如为齐次边界条件，式（1.3-16）右端向量不变。

第一类边界条件又称为强加边界条件，设在 n 个总节点中有第一类边界点 t，边界节点上的磁位值已知，那么，在方程组中应减去已知磁位的方程，同时修改其他方程

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & 0 & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & 0 & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & 0 & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_t \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 - k_{1t}A_t \\ p_2 - k_{2t}A_t \\ \vdots \\ A_t \\ \vdots \\ p_n - k_{nt}A_t \end{bmatrix} \tag{1.3-18}$$

当区域内所有的第一类边界节点都用上述方法处理后，即形成最终的代数方程组。

2.5 方程组的求解

有限元方程的系数矩阵是对称、正定且具有稀疏性，用 ICCG 法结合非零元素压缩存储求解是比较常用和有效的方法。

由于电机内部通常存在铁心，其磁导率不是常数，则方程式（1.3-18）为非线性方程组，通常用牛顿-拉斐森迭代法求解。具体过程如下：

式（1.3-18）的简洁形式为

$$[k]\{A\} = \{\Delta p\} \tag{1.3-19}$$

令 $\{f(A)\} = [k]\{A\}$，将其按泰勒级数展开，并略去高次项，得到原非线性方程组的牛顿-拉斐森迭代格式

$$[J]^k\{\Delta A\} = \{\Delta p\} \tag{1.3-20}$$

式中，$\{\Delta A\}$ 为两次迭代节点磁位差，$\{\Delta A\} = \{A\}^{k+1} - \{A\}^k$；$\{\Delta p\}$ 为剩余向量，$\{\Delta p\} = \{p\} - \{f(A)\}$；$[J]^k$ 为第 k 次迭代的雅可宾矩阵，同有限元方程的系数矩阵一样，总体雅可宾矩阵是单元雅可宾矩阵的叠加，其单元计算公式为

$$[J]_e = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_i}{\partial A_i} & \dfrac{\partial f_i}{\partial A_j} & \dfrac{\partial f_i}{\partial A_m} \\ \dfrac{\partial f_j}{\partial A_i} & \dfrac{\partial f_j}{\partial A_j} & \dfrac{\partial f_j}{\partial A_m} \\ \dfrac{\partial f_m}{\partial A_i} & \dfrac{\partial f_m}{\partial A_j} & \dfrac{\partial f_m}{\partial A_m} \end{bmatrix} \tag{1.3-21}$$

$$\{\Delta p\}_e = \begin{bmatrix} p_i - f_i \\ p_j - f_j \\ p_m - f_m \end{bmatrix} \tag{1.3-22}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式中

$$\begin{cases} f_i = k_{ii}A_i + k_{ij}A_j + k_{im}A_m \\ f_j = k_{ji}A_i + k_{jj}A_j + k_{jm}A_m \\ f_m = k_{mi}A_i + k_{mj}A_j + k_{mm}A_m \end{cases} \tag{1.3-23}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial f_t}{\partial A_t} = k_{tt} + \dfrac{f_t^2}{\nu^2 B\Delta}\dfrac{\partial \nu}{\partial B} & t = i,j,m \\ \dfrac{\partial f_h}{\partial A_t} = k_{ht} + \dfrac{f_t f_h}{\nu^2 B\Delta}\dfrac{\partial \nu}{\partial B} & h,t = i,j,m;h \neq t \end{cases} \tag{1.3-24}$$

由此可见，线性媒质时的系数矩阵就是雅可宾矩阵。对于非线性问题，只要根据所用材料的磁化曲线得到 $\partial\nu/\partial B$，就可以求得雅可宾矩阵。在形成 $[J]$ 和 $\{\Delta p\}$ 之后，式 (1.3-21) 就可以求解了。经过适当次数的迭代后，其右端项接近于零，从而使解趋于收敛。

现在电磁场有限元计算程序的功能已比较完善，在给出求解区域的几何特征参数、材料物理特性、场源分布的情况下，计算程序能自动完成网格剖分、建立方程和求解计算等。图 1.3-1 所示永磁电机求解区域的网格剖分和永磁磁场计算结果如图 1.3-3 和图 1.3-4 所示。

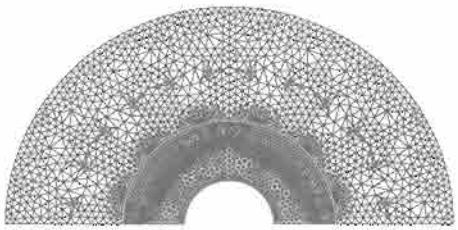


图 1.3-3　永磁电机求解区域的网格剖分

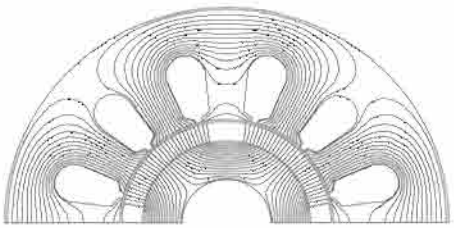


图 1.3-4　永磁磁场磁力线分布

2.6　二维矢量位磁场的后续计算

电机电磁场计算的目的是获得电机的有关性能数据和参数，有限元法计算得到的是节点磁位值，还需通过后处理求得所需的场量。

(1) 磁感应强度

在任一三角单元中，磁感应强度的两个分量为

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\partial A}{\partial y} = \frac{b_i A_i + b_j A_j + b_m A_m}{2\Delta} \\ B_y &= -\frac{\partial A}{\partial x} = -\frac{c_i A_i + c_j A_j + c_m A_m}{2\Delta} \end{aligned} \tag{1.3-25}$$

可见，每个一阶线性三角形单元中的磁通密度 B 为常数，场量不再连续。为了减少误差，需要采用较密的网格剖分，或者采用高价插值单元。

(2) 画二维磁场

在二维磁场中，磁力线就是等 A 线，即 A=常数的轨迹，有

$$\mathrm{d}A = \left(\frac{\partial A}{\partial x}\mathrm{d}x + \frac{\partial A}{\partial y}\mathrm{d}y\right) = 0 \tag{1.3-26}$$

平面场的磁力线方程是

$$\begin{aligned} B \times \mathrm{d}l &= \left(\frac{\partial A}{\partial y}i - \frac{\partial A}{\partial x}j\right) \times (\mathrm{d}x i + \mathrm{d}y j) \\ &= \left(\frac{\partial A}{\partial x}\mathrm{d}y + \frac{\partial A}{\partial y}\mathrm{d}y\right)k = 0 \end{aligned} \tag{1.3-27}$$

与等 A 线方程相同，说明平面场中等 A 线就是磁力线。

(3) 磁通

场域中，点 A 与点 B 之间的磁通 (z 轴单位长度内)

$$\Phi = A_z|_A - A_z|_B \tag{1.3-28}$$

(4) 磁链

设磁场中有一个线圈边，导体数为 N，总截面积 S，拥有的单元个数为 k，则磁链

$$\Psi = \frac{N}{S}\sum_k (A_i + A_j + A_m)\Delta_k/3 \tag{1.3-29}$$

(5) 电感

设绕组电流为 i，匝链的磁链为 Ψ，则电感为

$$L = \frac{\Psi}{i} \tag{1.3-30}$$

(6) 电动势

通过磁链对时间求导即可求得感应电动势

$$e = \frac{\partial \Psi}{\partial t} \tag{1.3-31}$$

显然，旋转电机电动势的计算，需要有不同转子位置时的磁链值，并对其求导。

3　电机电磁场计算数值、解析结合法

电机电磁场数值计算在现代电机设计中的作用越来越大，同时现代电机设计对电磁场计算的要求也越来越高。电机电磁场分析的目的是为了能够精确地计算电机的有关性能数据，为电机设计提供可靠的依据。有限元法通用性好，计算精度高，一般而言，只要网格分布疏密合理、单元几何品质优良(如三角形单元，应尽量为等边三角形)，就能得到满意的计算精度。然而，有限元法计算直接得到的是电机场域内的磁位值，为了获得描述电机运行状况的有关物理量，如感应电动势、电磁转矩、电感参数等，还需进行再次计算，也就是所谓的后处理。有限元法获得的节点磁位值是一组离散数据，计算有关物理量并不十分方便，而且由矢量磁位的偏导数得到的磁通密度已不再连续，会导致计算精度下降。

感应电动势和电磁转矩是反映旋转电机内部机电能量转换的重要物理量，其准确计算对电机设计和性能分析非常重要。

根据法拉第电磁感应定律，感应电动势通过磁链对时间的求导获得。规则的做法是先对不同的转子位置逐个进行磁场计算，算出随转子位置变化的绕组磁链，然后对磁链求导计算出感应电动势。这一过程需要解决转子的转动、转动角的选择和磁链导数计算等问题。首先要避免转子转动引起气隙网格的畸变，网格畸变会影响有限元法的计算精度。转动角度的大小同样需要慎重选择，角度太大将影响磁链导数的计算精度；角度太小，则对气隙网格剖分的要求太高，其选取需要专业的判断和经验。

有限元法计算电磁转矩，一般采用虚位移法或麦克斯韦应力张量法，从计算精度考虑，两种方法都要求有高质量的网格剖分。虚位移法根据磁场储能对转子位置角求偏导数计算转矩，因此，算一个转矩值虚位移法至少要计算两次磁场，效率不高。麦克斯韦应力张量法计算电磁转矩时，气隙中的线积分路径要穿过许多有限元网格，这时网格的品质及

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

从何处穿过网格单元都会对计算结果产生影响，实际计算中同样需要专业的判断和经验。一般做法是将气隙分为三层，积分路径取在中间层的网格上，理想的网格形状应该是等边三角形，由于电机气隙是个非常狭窄的区域，如此剖分难度颇高。气隙网格的存在使电磁转矩计算结果与积分路径无关的结论无法体现。

无论是感应电动势或者电磁转矩计算，都需要不同转子位置时的磁场计算，即实现转子的转动。有限元法计算电机电磁场主要有三个步骤：前处理、场计算、后处理。前处理主要是区域剖分，经过多年的研究，网格自动剖分技术日益成熟和完善，而且已能根据计算精度进行自适应剖分。但是，在处理转子转动时存在着一个两难的问题。从计算效率的角度考虑，转子转动时应尽量避免重新剖分。因为如果每次计算都按有限元法的三个步骤轮流进行一次，总的计算时间、精力都将大大增加。然而，如果转子转动时不采取任何措施，必将引起气隙网格的畸变，气隙网格品质变差，计算精度随之下降，严重时将引起解的不稳定，甚至得出错误的结果。目前针对转动而采取的比较有效的方法是运动边界法，选定气隙中一条运动边界将定、转子一分为二，运动边界线上的节点均匀分布。转子转动时有一定的限定条件，即转动角度应刚好对应整数个节点，以保持气隙网格形状良好，无法做到转子以任意角度转动。

数值法和解析法相结合则能很好地解决转子转动问题。事实上，转子转动困难的根本原因是气隙区域中存在有限元网格。气隙网格使定、转子之间产生了硬性连接，致使任一方的相对移动必然牵扯到另一方。假如气隙中没有剖分网格，转子转动的根本障碍自然消除，难题也就迎刃而解了。气隙区域的特点是无电流、常数磁导率和边界形状规则，适用解析法求解。于是就有了将数值法和解析法相结合的方法。数值解析结合法计算电机磁场的基本思路是，将电机划分为定子、气隙和转子三个区域，考虑到电机定转子中通常有铁心和绕组，所以这两个区域仍然采用有限元法，以便处理铁心饱和引起的非线性和电流。而气隙中的磁场则用解析方程表示，再利用区域间的交界条件连接两类方程。数值法与解析法结合，两者优势互补，既保持了原来有限元法的通用性，气隙中又没有网格，从而能够实现转子的自由转动，使磁场多次反复计算方便，后处理计算精度也得到提高。

3.1 数值解析结合法气隙磁场模型

根据变分原理，有限元法通过求解能量泛函的极值问题获得电机磁场的解答。如果将式（1.3-5）中的求解区域划分为定子、气隙和转子三个部分，那么，其总能量泛函就是三部分之和

$$W = W_S + W_a + W_R \tag{1.3-32}$$

式中，W 为总能量泛函；W_S 为定子区域的能量泛函；W_a 为气隙区域的能量泛函；W_R 为转子区域的能量泛函。

在气隙区域中无电流存在，矢量磁位满足拉普拉斯方程。而且气隙区域形状规则，可以获得解析表达式。对于旋转电机，在极坐标下气隙磁场的解析表达式为

$$A_Z(r,\theta) = \sum_{n=1}^{\infty}[(A_n r^{pn} + B_n r^{-pn})\cos(np\theta) + (c_n r^{pn} + D_n r^{-pn})\sin(np\theta)] + A_0 \ln r + B_0 \tag{1.3-33}$$

式中，p 为周期数。对于整数槽电机，即是极对数。对于分数槽电机，由于极对数与槽数互质，需找出最小周期数。由式（1.3-33）可得气隙磁通密度两个分量

$$B_r = \frac{1}{r}\frac{\partial A_z}{\partial \theta} = \sum_{n=1}^{\infty}\left[-(A_n r^{pn-1} + B_n r^{-pn-1})np\sin np\theta + (C_n r^{pn-1} + D_n r^{-pn-1})np\cos np\theta\right] \tag{1.3-34}$$

$$B_\theta = -\frac{\partial A_z}{\partial r} = -\sum_{n=1}^{\infty}\left[(A_n r^{pn-1} - B_n r^{-pn-1})np\cos np\theta + (C_n r^{pn-1} - D_n r^{-pn-1})np\sin np\theta\right] - \frac{A_0}{r} \tag{1.3-35}$$

因为气隙磁场能量

$$W_a = \iint_{\Omega}\frac{1}{2}\nu_0 B^2 \mathrm{d}\Omega = \int_0^{2\pi/p}\frac{1}{2}\nu_0 \mathrm{d}\theta\int_{R_r}^{R_s} B^2 r\mathrm{d}r \tag{1.3-36}$$

式中，R_s 为定子气隙表面半径；R_r 为转子气隙表面半径，则

$$W_a = \frac{\nu_0\pi}{2}\sum_{n=1}^{\infty}(np)\left[(A_n^2 + C_n^2)(R_s^{2pn} - R_r^{2pn}) - (B_n^2 + D_n^2)(R_s^{-2pn} - R_r^{-2pn})\right] + \frac{\nu_0\pi}{p}A_0^2\ln\left(\frac{R_s}{R_r}\right) \tag{1.3-37}$$

在定转子的气隙表面，考虑到周期性，矢量磁位可分别表示为

$$A_Z(R_s,\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}[a_n\cos np\theta + b_n\sin np\theta]$$

$$A_Z(R_r,\theta) = \frac{c_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}[c_n\cos np\theta + d_n\sin np\theta] \tag{1.3-38}$$

式（1.3-38）与式（1.3-33）联立可解得系数间的关系

$$\left.\begin{aligned} A_n &= (a_n R_r^{-pn} - c_n R_s^{-pn})/\Delta_n \\ B_n &= (c_n R_s^{pn} - a_n R_r^{pn})/\Delta_n \\ C_n &= (b_n R_r^{-pn} - d_n R_s^{-pn})/\Delta_n \\ D_n &= (d_n R_s^{pn} - b_n R_r^{pn})/\Delta_n \\ \Delta_n &= R_s^{pn}R_r^{-pn} - R_r^{pn}R_s^{-pn} \\ A_0 &= \frac{1}{2}(a_0 - c_0)\Big/\ln\left(\frac{R_s}{R_r}\right) \\ B_0 &= \frac{1}{2}(c_0\ln R_s - a_0\ln R_r)\Big/\ln\left(\frac{R_s}{R_r}\right) \end{aligned}\right\} \tag{1.3-39}$$

代入气隙磁场能量泛函有

$$W_a = \frac{\pi\nu_0}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n}{q^{2pn}-1}\left[(a_n^2 + b_n^2 + c_n^2 + d_n^2)(q^{2pn}+1) - 4(a_n c_n + b_n d_n)q^{pn}\right] + \frac{\pi\nu_0}{4p\ln q}(a_0 - c_0)^2 \tag{1.3-40}$$

式中，$q = R_s/R_r$。上式对磁位求导，可获得磁场离散方程式中对应元素的“贡献”值。

3.2 两类方程的连接

气隙磁场解析表达式和定转子磁场有限元方程的正确连

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

接是能否实现数值解析结合法的关键。两类磁场方程在交界处相连接，应同时满足第一类和第二类边界条件。即同一点的矢量磁位必定相等；磁场强度切向分量在分界线也应满足相应的交界条件。通常，气隙区域的划分是灵活的，选择无电流的气隙交界面总是能够做到的。于是定、转子气隙交界面上磁场强度切向分量连续，成为自然交界条件，在条件变分中不需要考虑，它在泛函求极值过程中自动得到满足。简要说明如下，式（1.3-5）中的线积分部分除了第二类边界，还包含气隙与定子以及气隙与转子的分界线。由于两种情况本质是一样的，不失一般性，考虑区域 Ω 内有两种媒质的情况。假设求解区域分别为 $\Omega+$ 和 $\Omega-$，其分界线为 l，在 l 上法线 n 的方向规定为从 $\Omega-$ 指向 $\Omega+$，如图 1.3-5 所示，则线积分为

$$\begin{aligned}\oint_{s}\nu\frac{\partial A}{\partial n}A\mathrm{d}s&=\int_{s_2}\nu\frac{\partial A}{\partial n}A\mathrm{d}s+\int_{l^-}\nu\frac{\partial A}{\partial n}A\mathrm{d}s-\int_{l^+}\nu\frac{\partial A}{\partial n}A\mathrm{d}s\\&=\int_{s_2}\nu\frac{\partial A}{\partial n}A\mathrm{d}s+\int_{l}\left[\left(\nu\frac{\partial A}{\partial n}\right)^{-}-\left(\nu\frac{\partial A}{\partial n}\right)^{+}\right]A\mathrm{d}s\end{aligned}\tag{1.3-41}$$

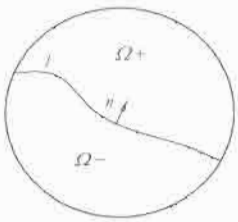


图 1.3-5　交界条件处理

因为在区域分界线上磁场强度切向分量相等，上式中在分界线 l 上的线积分为零。这说明气隙磁场与定转子磁场分界线上磁场强度切向分量相等将使其上的线积分自动为零。所以两类方程连接时只要满足矢量磁位相等的交界条件即可，使方程的衔接过程不仅比较简单，而且实现的是有限元方程和解析表达式的无误差连接。

3.3　气隙磁场有关系数的计算

设剖分后定子气隙表面节点数 M_s、转子气隙表面节点数 M_r。在整周期条件下，有

$$\begin{aligned}A_s(\theta_1)&=A_s(\theta_{M_s})\\A_r(\delta_1)&=A_r(\delta_{M_r})\end{aligned}\tag{1.3-42}$$

式中，下标 s、r 分别表示定子和转子；θ、δ 分别表示定转子气隙表面节点的位置角。假定气隙表面磁位是节点磁位的线性函数，得各系数为

$$a_0=\frac{p}{\pi}\sum_{i=2}^{M_s}(\eta_i+\eta_{i+1})A_s(\theta_i)\tag{1.3-43}$$

$$\begin{aligned}a_n&=\frac{1}{\pi pn^2}\sum_{i=2}^{M_s}\left(\frac{\sin np\xi_i\sin np\eta_i}{\eta_i}-\frac{\sin np\xi_{i+1}\sin np\eta_{i+1}}{\eta_{i+1}}\right)A_s(\theta_i)\\b_n&=\frac{1}{\pi pn^2}\sum_{i=2}^{M_s}\left(\frac{\cos np\xi_i\sin np\eta_i}{\eta_i}-\frac{\cos np\xi_{i+1}\sin np\eta_{i+1}}{\eta_{i+1}}\right)A_s(\theta_i)\end{aligned}\tag{1.3-44}$$

式中

$$\begin{aligned}\xi_i&=(\theta_i+\theta_{i-1})/2\\\eta_i&=(\theta_i-\theta_{i-1})/2\end{aligned}\tag{1.3-45}$$

同理

$$c_0=\frac{p}{\pi}\sum_{j=2}^{M_r}(\beta_j+\beta_{j+1})A_r(\delta_j)\tag{1.3-46}$$

$$\begin{aligned}c_n&=\frac{1}{\pi pn^2}\sum_{j=2}^{M_r}\left(\frac{\sin np\alpha_j\sin np\beta_j}{\beta_j}-\frac{\sin np\alpha_{j+1}\sin np\beta_{j+1}}{\beta_{j+1}}\right)A_r(\delta_j)\\d_n&=\frac{1}{\pi pn^2}\sum_{j=2}^{M_r}\left(\frac{\cos np\alpha_j\sin np\beta_j}{\beta_j}-\frac{\cos np\alpha_{j+1}\sin np\beta_{j+1}}{\beta_{j+1}}\right)A_r(\delta_j)\end{aligned}\tag{1.3-47}$$

式中

$$\begin{aligned}\alpha_j&=(\delta_j+\delta_{j-1})/2\\\beta_j&=(\delta_j-\delta_{j-1})/2\end{aligned}\tag{1.3-48}$$

为清楚起见，将气隙能量泛函看作对应磁位周期分量和恒定分量两部分 $W_{a\sim}$ 和 W_{a0}，并令

$$s_n=\frac{n(q^{2n}+1)}{q^{2n}-1}\qquad t_n=\frac{4nq^n}{q^{2n}-1}\tag{1.3-49}$$

对矢量磁位的恒定分量求偏导

$$\frac{\partial W_{a0}}{\partial A_{si}}=\frac{\nu_0}{2\ln q}(\eta_i+\eta_{i+1})(a_0-c_0)\quad i=2,3,\cdots,M_s\tag{1.3-50}$$

$$\frac{\partial W_{a0}}{\partial A_{rj}}=-\frac{\nu_0}{2\ln q}(\beta_j+\beta_{j+1})(a_0-c_0)\quad j=2,3,\cdots,M_r\tag{1.3-51}$$

对矢量磁位的周期分量求偏导

$$\begin{aligned}\frac{\partial W_{a\sim}}{\partial A_{si}}=&\frac{1}{2}\nu_0\pi\sum_{n=1}^{\infty}\left[s_n\left(2a_n\frac{\partial a_n}{\partial A_{si}}+2b_n\frac{\partial b_n}{\partial A_{si}}\right)-\right.\\&\left.t_n\left(c_n\frac{\partial a_n}{\partial A_{si}}+d_n\frac{\partial b_n}{\partial A_{si}}\right)\right]\quad i=2,3,\cdots,M_s\end{aligned}\tag{1.3-52}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial W_{a\sim}}{\partial A_{rj}}=&\frac{1}{2}\nu_0\pi\sum_{n=1}^{\infty}\left[s_n\left(2c_n\frac{\partial c_n}{\partial A_{rj}}+2d_n\frac{\partial d_n}{\partial A_{rj}}\right)-\right.\\&\left.t_n\left(a_n\frac{\partial c_n}{\partial A_{rj}}+b_n\frac{\partial d_n}{\partial A_{rj}}\right)\right]\quad j=2,3,\cdots,M_r\end{aligned}\tag{1.3-53}$$

以上表达式中系数 a_0、a_n、b_n 和 c_0、c_n、d_n 分别是定、转子气隙表面节点磁位的函数，于是可以获得定、转子表面节点对应的矩阵元素“贡献”值。

数值解析结合法中，首先用有限元法对电机定、转子区域离散剖分，形成系数矩阵。该矩阵尚不完整，定、转子之间没有发生联系。通过对气隙能量泛函求偏导，获得与定、转子气隙表面节点相关的系数，插入矩阵中相应的元素位置，最后形成完整的磁场离散方程式。

3.4　磁场离散系数矩阵修改及其对称性

数值解析结合法中，电机定、转子磁场仍用有限元法处理。先将定、转子区域剖分成有限个三角形单元，并在三角形单元中构造插值函数，将单元的能量泛函转化为能量函数，也就是将条件变分问题离散化，将能量泛函的极值问题转换成能量函数的极值问题。其过程包括：单元分析、总体合成、强加边界条件的修改，最后形成系数矩阵。但该矩阵尚不完整，定、转子之间没有发生联系。假设定子区域的节点编号在前，则系数矩阵的形式为

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_{ss}&0\\0&\boldsymbol{K}_{rr}\end{bmatrix}\tag{1.3-54}$$

式中，$\boldsymbol{K}_{ss}$ 为定子区域的系数子矩阵；$\boldsymbol{K}_{rr}$ 为转子区域的系数

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

子矩阵。接着需将气隙磁场表达式中的相关系数插入上述系数矩阵中。设定子气隙表面的任意两节点为 I、J，转子表面的任意两节点为 M、N，如图 1.3-6 所示。用有限元产生的初始矩阵中定、转子节点不发生联系，如图 1.3-7 所示。可以证明，当将解析表达式的相关系数贡献到用有限元产生的定、转子初始矩阵后，其矩阵依然保持对称性。

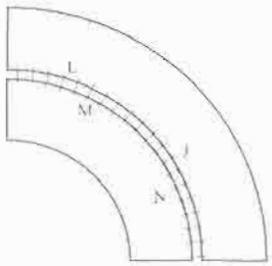


图 1.3-6 定、转子气隙表面节点示意图



图 1.3-7 有限元产生的初始矩阵



图 1.3-8 气隙系数贡献元素示意图

3.5 转子的自由转动

旋转电机磁场计算数值解析结合法的一个重要特点是气隙区域中不再存在剖分网格，消除了转动困难的根本障碍，为转子的自由转动创造了有利条件。在数值解析结合法中，经过一次剖分后，定、转子节点初始坐标确定。当转子转动时，定、转子网格均保持不变，定子节点坐标自然保持不变，只是转子节点坐标随转子转动而发生变化。利用坐标变换可以方便地得到新的转子节点坐标。根据转子相对初始位置的转动角，转子各节点的新旧坐标的关系为（见图 1.3-9）

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0\cos\gamma - y_0\sin\gamma \\ y_1 &= x_0\sin\gamma + y_0\cos\gamma \end{aligned} \tag{1.3-55}$$

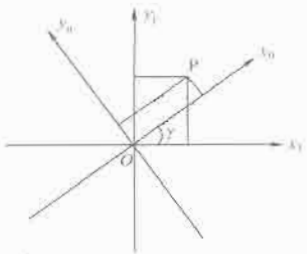


图 1.3-9 转子旋转时节点坐标的变换

转子转动一个角度，只需做一次坐标变换运算，定、转子区域的网格剖分不变。由于气隙区域网格畸变问题根本不存在，转子转动的角度自然可以是任意的。这一特点对旋转电机的磁场计算非常重要，为绕组感应电动势、电磁转矩乃至电机动态运行计算都提供了方便。

3.6 气隙磁场解析解的应用

（1）气隙磁场计算

在将气隙解析方程式对应的元素贡献到原系数矩阵后，对于 M_s 个定子气隙边界节点和 M_r 个转子气隙边界节点，两组节点对应的子矩阵是满阵。说明定、转子之间通过气隙建立了联系。由于矩阵依然保持对称，原先有限元法程序中采用的对称矩阵元素存储方法以及方程求解方法仍然可以使用，其系数阵如图 1.3-8 所示。

数值解析结合法计算电机磁场，可以获得气隙磁通密度的解析解，由式（1.3-34）、式（1.3-35）和式（1.3-39），有

$$\begin{aligned} B_t = \frac{p}{r}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n}{\Delta_n}\{&-[a_n(r^{np}/R_i^{np} - R_i^{np}/r^{np}) - \\ &c_n(r^{np}/R_s^{np} - R_s^{np}/r^{np})]\sin np\theta + [b_n(r^{np}/R_i^{np} - \\ &d_n(r^{np}/R_s^{np} - R_s^{np}/r^{np})]\cos np\theta\} \end{aligned} \tag{1.3-56}$$

$$\begin{aligned} B_0 = \frac{p}{r}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n}{\Delta_n}\{&-[a_n(r^{np}/R_i^{np} + R_i^{np}/r^{np}) + \\ &c_n(r^{np}/R_s^{np} + R_s^{np}/r^{np})]\cos np\theta + [-b_n(r^{np}/R_i^{np} + \\ &R_i^{np}/r^{np}) + d_n(r^{np}/R_s^{np} + R_s^{np}/r^{np})]\sin np\theta\} \end{aligned} \tag{1.3-57}$$

由此可见，气隙区域内的磁通密度已是连续函数，根据以上表达式可以计算出气隙区域内任一点的磁通密度，并可绘制出相应的变化曲线，为气隙磁场分析提供了方便。

（2）感应电动势计算

感应电动势计算需要进行转子的转动，由于数值解析结合法实现了转子的自由转动，为感应电动势的精确计算创造了条件。根据法拉第电磁感应定律，绕组感应电动势为

$$e = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}\theta}\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = -\omega\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}\theta} \tag{1.3-58}$$

对于确定的一个转子位置，通过磁场计算可以得到该位置时绕组的磁链，随着转子位置不断的改变，最终可得一个周期内作为转子位置角函数的绕组磁链曲线。考虑到感应电动势计算需要对磁链求导，为了确保导数计算的精度，磁链曲线数据点应足够密，通常每隔 2°（电角度）计算一次磁场和磁链已能满足要求。因为数据密度高，可利用曲线拟合技术求得磁链曲线表达式，然后对其求导得到感应电动势。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

（3）电磁转矩计算

麦克斯韦应力张量法是目前采用较多的方法。根据麦克斯韦应力张量法理论，总体积 V 内的有质动力 f 与闭合面 S 上的应力张量 T 有如下的等效关系

$$F=\int_V f\mathrm{d}V=\oint_S T\mathrm{d}S \tag{1.3-59}$$

或

$$f=\mathrm{d}iVT \tag{1.3-60}$$

式中，F 为总体积 V 产生的合力。经推导，二维情况下合力为

$$F=\oint_S\left\{\left[V_0\left(B_y^2-\frac{1}{2}B^2\right)n_x+V_0B_yB_xn_y\right]i+\left[V_0B_xB_yn_x+V_0\left(B_x^2-\frac{1}{2}B^2\right)n_y\right]j\right\}\mathrm{d}S \tag{1.3-61}$$

式中，B_x、B_y、B 分别为磁感应密度的 x、y 分量和幅值，n_x、n_y 为法向矢量的 x、y 分量。旋转电机中，计算作用在转子上的电磁力，一般闭合曲面选在通过气隙的圆柱面上，于是有

$$F=\oint_l\left[\frac{1}{\mu_0}B(Bn)-\frac{1}{2\mu_0}B^2n\right]l_1\mathrm{d}l \tag{1.3-62}$$

进一步有

$$\begin{aligned}F&=\oint_l\left[\frac{1}{\mu_0}(B_nn+B_tt)B_n-\frac{1}{2\mu_0}B^2n\right]l_1\mathrm{d}l\\&=\oint_l\left[\frac{1}{2\mu_0}(B_n^2-B_t^2)n+\frac{1}{\mu_0}B_nB_tt\right]l_1\mathrm{d}l\\&=F_nn+F_tt\end{aligned} \tag{1.3-63}$$

由此可见，作用于电机转子上的切向电磁力密度

$$f_t=\frac{1}{\mu_0}B_nB_t \tag{1.3-64}$$

电磁转矩由切向力产生，如果沿半径 r 的圆周积分，则电磁转矩的表达式为

$$T_{\mathrm{em}}=\frac{L_{\mathrm{ef}}}{\mu_0}\int_0^{2\pi}r^2B_rB_\theta\mathrm{d}\theta \tag{1.3-65}$$

式中，r 位于气隙中的任意圆周半径；B_r、B_θ 分别为半径 r 处气隙磁通密度的径向和切向分量。将式（1.3-56）、式（1.3-57）代入上式，得

$$T_{\mathrm{em}}=\frac{L_{\mathrm{ef}}}{\mu_0}\int_0^{2\pi}r^2B_rB_\theta\mathrm{d}\theta=\frac{2\pi L_{\mathrm{ef}}p^2}{\mu_0}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n^2}{\Delta_n}(b_nc_n-a_nd_n) \tag{1.3-66}$$

从上式可见，电磁转矩的大小确实与所取闭曲面的半径大小无关，与理论相符合。

麦克斯韦应力张量法计算电磁转矩每次只需进行一次磁场计算，相对磁能法运算量小。由于应力张量法要在气隙中进行线积分，在纯有限元法中，其积分路径对计算精度有很大的影响，因此对气隙网格剖分有较高的要求，理想的单元形状是等边三角形。有时为了捕捉到齿槽定位转矩的最大值，不得不在圆周方向作非常精细的剖分，但这在狭窄的气隙区域内很难实现，有时几乎是不可能的。采用数值解析结合法，气隙中没有剖分网格，以上问题不存在。在获得气隙磁场密度解析表达式后，只需通过有关系数的计算即可求得电磁转矩，不会受到剖分网格的困扰，不仅方便，精度也可以保证。

以一台轮毂式永磁无刷直流电机为例，转子永磁极对数 $p=11$、定子槽数 $Q=24$。利用周期性，磁场计算区域选为半圆区域。其中定、转子气隙表面节点数分别为 253 和 199。气隙磁场解析解的级数展开的项数取为 100。空载磁场计算的磁力线分布如图 1.3-10 所示。为了计算电机的感应电动势，还要将转子位置进行转动。将转角位置每隔 2°（电角度）计算一次磁场，从而得到电机绕组磁链变化曲线。由于点数足够多，可采用曲线拟合方法，求得磁链曲线各次谐波的系数，也就得到了磁链函数的数学表达式。然后对磁链函数求导即可方便地计算出绕组感应电动势。图 1.3-11 为感应电动势实测曲线，图 1.3-12 为感应电动势的计算曲线，两者吻合很好。

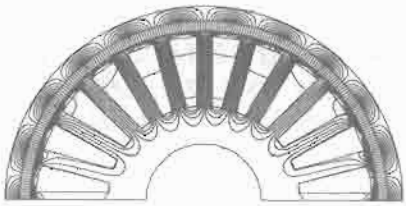


图 1.3-10　空载磁场磁力线分布

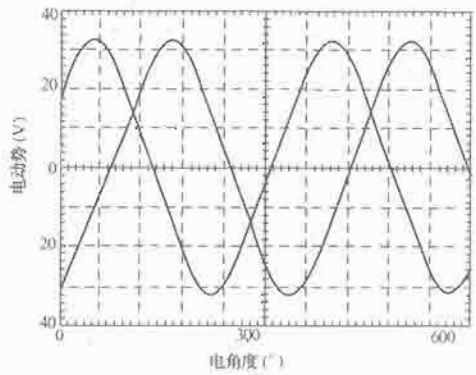


图 1.3-11　感应电动势实测曲线

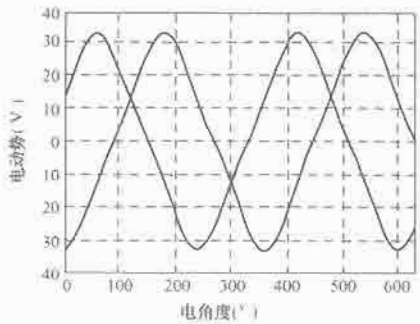


图 1.3-12　感应电动势的计算曲线

本例求解区域为半个圆周，电角度为 1980°。若采用纯有限元法，按每隔 2°电角度剖分，那么在半个圆周的气隙线上至少要有 991 个节点。显然，在气隙内采用如此高密度剖分是无法承受的。由此也体现出数值解析结合法的优势之处。

4　电机的计算机辅助设计和优化设计

电机的计算机辅助设计和优化设计可用图 1.3-13 的简单框图来表示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

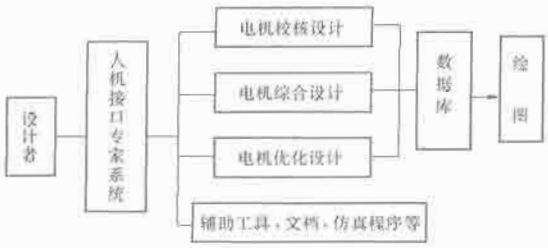


图 1.3-13 电机的计算机辅助设计框图

4.1 电机计算机辅助设计的一般过程与一些问题的处理方法

4.1.1 电机计算机辅助设计的一般过程

计算机辅助电机设计一般按以下几个过程进行：

（1）数学模型的建立

电机的计算机辅助设计在确定了设计任务、准备了原始资料及必要的数据后，首先必须建立设计计算的数学模型。所谓数学模型，就是对实际问题经过分析、试验之后用一系列的数学算式来描述的一种方式。数学模型的正确与否及误差都将给设计的精确度带来决定的影响。

（2）框图设计

编制框图的过程是设计人员按计算机的方式表达设计逻辑的过程，它表达了设计人员的设计思路和方法。框图可以清晰地表示语言源程序的结构、层次及重要的细节，它是编制语言程序的依据，而且对于阅读、调整和修正源程序也有帮助的。

编制电机设计的计算机程序框图，一般的原则如下：

1）框图一般由开始、输入、赋值、运算、判别、说明、打印输出、停机等框格及联结各框的、表示执行的标矢线所组成。电机设计程序框图的主要部分包括输入数据、磁路计算、性能与损耗计算、温升计算、机械结构的计算、图形输出（包括零件图、总装图、电气接线图等）。框图可分为整体框图和分框图，整体框图可简明些，分框图可根据需要略详细些。但总体上要求结构紧凑、清晰、层次分明，设计逻辑简洁明了。

2）编制框图要考虑到设计中哪些是主要矛盾及其解决途径，如改善性能需通过哪些途径及改变哪些变量等。

3）编制框图应注意到凡需要迭代办法确定的计算值都要给定初值，安排“判别”框，以保证假定值与计算值相符的程度达到的精度要求。对反复多次用到的程序段，当被作为子程序来调用时，也应在框图中体现出来。此外，还要注意安排好数据输出，特别是中间输出。

（3）程序编制

对电机设计中将已有的算式编成计算机语言这一过程来说，它和一般编程没有什么两样。但对于电机设计本身所具有的一些特点，在编制电机设计的计算机运算程序时，应注意以下几个方面：

1）编制计算机辅助电机设计程序中最突出和麻烦的问题是图表和曲线的处理，这个问题将在后面介绍。对于处理图表曲线的程序段和一些重复计算的程序段，可将其编成一子程序，或循环语言，使程序简洁、紧凑、层次分明，也便于编译；分程序（如磁路计算部分、性能计算部分等）的起始部分，可写上注释语句；关键段落，可安置适当标号，以便于程序检查；对于大量的输入、输出数据，须精心合理安排。

2）对于导线线规的优选和槽形的优化，要注意设计逻辑，避免出现难于收敛或收敛不理想的情况；对于要用迭代计算的各系数，要慎重给定初始数据和调整方法，做到给值合理，有利收敛。

3）要注意电磁计算程序与绘图程序的衔接问题，其中有些标识符要尽可能统一，以便于绘图程序从电磁计算程序中读入有关数据。

（4）程序检验与运行

当程序编制完毕后，即可通过输入设备将其送入计算机内进行编译。此时，计算机上的编译程序对进去的源程序进行各种语法规则的检查。对于编译过程中计算机所提示的每一个错误信息，只有冷静地分析，认真仔细地对待，才能较快地使其程序顺利地通过编译。程序编译通过后，说明该程序在语法上已没有问题了。这样的程序可以运行，但不一定能正确地运行。必须根据手算或别人已算出的确认为正确的一套原始数据输入计算机进入试算运行，然后对本程序的输出结果与已知结果进行比较，当两个结果完全一致后，才能认为程序运行正确，计算结果可靠。如果是多功能程序，则必须对各项功能逐一进行试算，直到符合为止。

当一个程序运行后，可能会发现一些地方可以进一步改善。例如，考虑到某种运算方法比原程序中的运算方法更好，或者由于事先估计不足，而出现了一些意外的情况，如原来准备的数组不够用，超界了等。这样，就要对源程序某些部分重新进行修改。修改程序时，要从整体考虑，注意前后联系。

4.1.2 电机计算机辅助设计中一些问题的处理方法

图表、曲线的数学处理。在工程设计和计算中，为了适应手算的需要，常常将一些可变的物理参数之间关系用图表或曲线形式给出，电机的设计演算情况也是如此。电机设计中用到的一些图表和曲线主要由两部分组成。一部分是由原来比较复杂的数学计算式计算后描绘而成，就异步电机设计程序而言，属于这一类的就有节距漏抗系数 K_U、K_L，槽下部单位漏磁导 λ_L，谐波单位漏磁导 ΣS、ΣR，转子挤流效应系数 $r_{\sim}/r_0$、$X_{\sim}/X_0$ 等；另一部分则是长期实践积累得到的试验数据、经验或半经验数据所描绘的。属于这一类的有波幅系数 F_s、轭部磁路校正系数 C_1、C_2，起动漏抗饱和系数 K_z，截面宽度突变修正系数 K_b，转子闭口槽上部单位漏磁导 λ_{t2}，硅钢片磁化曲线、损耗曲线等。这些曲线对于人工计算时查找是方便的，但对于计算机运算而言，则是不可取的。为了充分利用计算机所具有的高速、精确的计算能力的特长，通常在编制计算机辅助电机设计程序时必须对图表和曲线进行必要的处理。处理方式一般分为以下几种：①尽可能采用原始精确公式计算；②采用近似公式计算；③存储少量数据配合采用插值法；④采用“比较”方式进行查表。下面就以异步电动机电磁设计中遇到的一些处理情况分别介绍如下：

1）采用原始公式计算。采用原始公式计算要注意两点：一是所采用的原始公式的计算范围应比原曲线的范围更大，这是因为原曲线的范围在实用上已足够，一旦遇到特殊情况超界时，在人工计算的情况下，人们会自动进行处理，但计算机若碰到这种超界的特殊情况则不行。二是为了便于计算机运算，对有些原始公式进行适当整理后，改变了它原有的形式，如槽下部单位漏磁导公式，就是把几种不同槽形用一个统一的公式来表示。

槽下部单位漏磁导 λ_L，对于平底槽、圆底槽、梨形槽三种槽形的槽下部单位漏磁导可统一写成

$$\lambda_L = \frac{h^3 b_2^2}{A_s^2}(K_{r1} + K_{r2} + K_{r3}) \qquad (1.3\text{-}67)$$

式中，A_s 为槽内导体占有的全部面积。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

h，b_2 等尺寸见叶云岳等编著《计算机辅助电机优化设计与制造》；且令 $K_1=h/b_2$，$K_2=b_1/b_2$，则

$$K_{r1}=0.3333-0.25(1-K_2)\left[0.25+\frac{0.3333}{1-K_2}+\frac{0.5}{(1-K_2)^2}+\frac{1}{(1-K_2)^3}+\frac{\ln K_2}{(1-K_2)^4}\right] \tag{1.3-68a}$$

$$K_{r2}=\frac{0.02197}{K_1^3}+\frac{0.19635}{K_1}-\frac{0.3927}{(1-K_2)K_1}-\left[\frac{0.1542}{(1-K_2)^2K_1^3}+\frac{0.3927}{(1-K_2)^2K_1}\right]\ln K_2 \tag{1.3-68b}$$

$$K_{r3}=\frac{0.7854}{K_1^3}[0.3927(1-K_2^2)+0.5(1+K_2)K_1]^2+\frac{1.0503}{K_1^3}[0.3927(1-K_2^2)+0.5(1+K_2)K_1]+0.3623\frac{K_2^4}{K_1^3} \tag{1.3-68c}$$

对于平底槽

$$A_s=h(b_1+b_2)/2$$

且 $K_2=K_{r3}=0$

对于圆底槽

$$A_s=\pi b_2^2/4+h(b_1+b_2)/2$$

且 $K_{r3}=0$

对于犁形槽

$$A_s=\pi(b_1^2+b_2^2)/8+h(b_1+b_2)/2$$

2）采用近似公式（曲线拟合方式）计算。一般来说，只要精度允许的话，凡由经验或试验测定得到的曲线，都可以用近似表达式来表示。也就是说，可以用近似的计算公式来逼近曲线，以期达到用较简单的计算公式来代替较复杂的曲线。

近似表达式一般是根据理论或经验初定一个函数关系式，然后设法确定这关系式一些特定的参数，参数确定的原则应使表达式的数据信息能较好地符合。采用近似表达式来处理这类曲线的一种较为常用和有效的数学方法为最小二乘法。

所谓最小二乘法，那就是用一个曲线方程来代替一组数据，并使原数据与曲线上相应点之间的“偏差之平方和”为最小。关于最小二乘法的处理方法及其应用，详见有关文献。

下面是硅钢片磁化曲线和损耗曲线的近似计算公式：

①硅钢片磁化曲线（DR510-50）

设 B 的单位为 T（特斯拉）

当 $0.4\mathrm{T}\leqslant B\leqslant 1.1\mathrm{T}$ 时

$H=-0.4614+8.319B-12.87B^2+8.9B^3$

当 $1.1\mathrm{T}\leqslant B\leqslant 1.37\mathrm{T}$ 时

$H=46.158-85.84B+44B^2$

当 $1.37\mathrm{T}\leqslant B\leqslant 1.5\mathrm{T}$ 时

$H=179.485-215.5B+13.54B^2+39.5B^3$

当 $1.5\mathrm{T}\leqslant B\leqslant 1.9\mathrm{T}$ 时

$H=1690.465-2324.85B+807.5B^2$ （1.3-69）

②硅钢片损耗曲线（DR510-50）

当 $0.5\mathrm{T}\leqslant B\leqslant 1\mathrm{T}$ 时

$p=-2.6138+12.2B+0.68544B^2$

当 $1\mathrm{T}\leqslant B<1.4\mathrm{T}$ 时

$p=9.5174-20.957B+27.857B^2$ （1.3-70）

当 $1.4\mathrm{T}\leqslant B\leqslant 1.85\mathrm{T}$ 时

$p=-10.9325+16.629B+11.429B^2$

3）采用插值法。由前面可知，一条曲线的近似公式的求取主要采用曲线拟合方法。而曲线拟合方式是从一组数据，如 N 对 (x_i,y_i) 去求得自变量 x 和因变量 y 的一个近似函数关系式 $y=f(x)$。因此，被确定的曲线原则上并不特别要求真正通过给定的某一个（或一些）点，而只要求它尽可能从给定点附近通过。当所确定的曲线要求通过给出的所有点时，就要采用另一种方法，即插值法。所谓“插值”，通俗地说，就是在所给定的一组数据 (x_i,y_i) 中再插进一些所需要的中间值。它的基本思想是，设法构造某个简单函数 $y=p(x)$ 作为 $f(x)$ 的近似表达式，然后计算 $p(x)$ 的值以得到 $f(x)$ 的近似值。当以两点间的直线代替原函数关系时，就称为线性插值；当用原曲线上顺序三个点所作出的抛物线来代替原函数关系时，就称为二次插值或抛物线插值……对电机设计中所用到的一些曲线和图表，在使用计算机运算时，不可能将无限多组的对应数据均存于计算机内，而只能将曲线“离散化”，输入有限量的对应数据（即曲线上有限个离散点的数据）。要求得到其他点上的值就可以采用“插值法”。

可用这种方法处理的曲线有：硅钢片磁化曲线，硅钢片损耗曲线，波幅系数 F_s，轭部磁路校正系数 C_1、C_2，转子闭口槽上部单位漏磁导 λ_{t2}，漏抗饱和系数 K_z，截面宽度突变修正系数 K_s 等。插值的具体方法详见上述文献。

4）计算机自动查表法。对于一些离散量组成的表格，凡不宜或不能用近似公式或拟合、插值方法来求取的，这时可预先将那些数据以数组方式储存于计算机中，然后让计算机自动寻找所需的数据。例如，电机设计中已算出导线截面积 NS，如何找到相近的线规？或者说，当定子槽面积 S_s 和每槽导体数确定后，如何根据给定的槽满率 S_f 从标准线规中选出导线截面积最大的一组线规？这里包括同样直径导线的多根并绕与不同直径导线的多根并绕。这些问题就是采用计算机查表法来解决的。它的方法，就是按原始人工查表的思路进行。它对离散的一组数据按次序逐一进行比较，最后找出你所需要的数据。现在的计算机查表，它的思路和人查表的最原始的想法是一样的。其方法和步骤如下（以聚酯漆包圆铜线为例，且已知某一圆截面为 S_1）：

①把常用的 $\phi(0.6\sim1.6)$ 共 18 个规格的标准线径依次编号，并以数组的形式存入计算机内。

②编制循环语句，让计算机由 1 号线规开始，由小到大逐号算出其截面积 S_1'，并逐个与已知截面 S_1 相比，直到某一线规的 $S_1'\geqslant S_1$ 时就停止，此时得出在下 S_1' 的线径 d_1'。但这时与 S_1 最接近的线规也可能是比这小一号的，即 S_1'' 下的 d_1''。因此必须进行再比较。

③用条件语句判断以上两个相邻线径 d_1' 与 d_1'' 中，哪个面积与 S_1 差得更小，然后就用哪个。但是，不管已知面积接近 1 号线径还是 18 号线径，作为计算机查找时总是要从 1 号开始逐个去比较。而不能从任意号开始，也就是必须有规律性地、按次序地寻找。这也正是人们查表的最原始的想法。

4.2　电机的计算机辅助“校核设计”

所谓计算机辅助电机的“校核设计”，就是该设计是按设计人员的预先估计好若干设计参量，例如，定、转子冲片尺寸、槽形尺寸、槽数、铁心长、绕组数据等，作为已知量输入计算机，然后，计算机依照一定的程序步骤、公式算出该设计的计算结果，而这些计算结果是否符合原定指标要求，则由设计人员自行判断。如果不符合要求时，人工将一些输入参量加以变化再校算之，直到算出符合指标要求的方案为止。所以，计算机辅助电机的“校核设计”相当于以计算机作为“高速计算尺”来替代人工手算而已。当然，它与人工手算相比，仍具有如下一些特点：

1）程序通用性强。应力求使程序适用于多种型式、多种规格电机的设计计算，同时又能反映它们各自的特点，并

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

具有扩展程序的功能，这就是校核程序的特点之一。

2）可使用各种复杂而精确的公式。作为运算速度越来越高的计算机来说，它不怕计算公式的冗长和烦琐，故可将原手算中的简化公式及数学模型恢复到虽然复杂然而却更精确的方式，例如谐波系数的计算、等效电路的计算等。

3）图表曲线要作处理。手工计算时为了方便，将一些较为复杂公式的计算值、一些试验值、经验数据画成曲线图表形式。而计算机计算情况则相反，它的许多功能实际上都归结为计算问题，因此，它对图表曲线需进行数学处理，具体见前文所述。

4）合适的输入数据安排。由于校核设计程序只是在给定设计参量后进行性能校核计算，为了得到满足性能要求的设计，通常要根据计算结果的分析，由设计人员决定调整若干设计参量。这种调整、运算工作要反复进行多次，而一般情况下，调整仅限于个别设计参量的改变。因此为了减少调整时重复输入不调整的数据，故可将一般不调整的数据编成公共数组，一次输入后基本不动，而将需调整的参量设立一个数组，可由键盘或 READ/DATA 语句或其他人机对话的方式输入，便于调整，从而使输入数据安排更得当。

5）合适的输出数据安排。设计人员对校核程序运行结果是否符合要求，主要是从输出数据了解到的。输出数据包括中间结果和最后结果。中间结果主要指程序运行中对一些计算完成的主要参数即时在屏幕上显示，通过这些数据，给设计人员以揭示，从而作出是否仍需继续运行下去的判断。而最后结果的数据，应包括设计人员需要的所有数据。这些数据要按一定的层次和分类排列。

校核设计程序的编程步骤与要点如下：

（1）了解机型，选择语言

在进行编程之前，了解一下你所使用的计算机，对该机的性能，包括运算速度、内存容量等，对该机的操作系统，所带的软件、内部函数以及其他各种功能，都要尽可能地熟悉，这样对准备编制多大规模的程序和采用什么样的语言都是所需的基本条件。

（2）根据设计任务来确定技术条件和评价标准

技术条件和评价标准是由电机制造部门和使用单位根据国家标准、用户要求、产品特点以及生产单位的技术水平共同协商确定的技术协议，它规定了电机的规格、型式（如额定电压、额定输出功率、转速、频率等），并规定了电机的技术性能指标（如效率、功率因数、最大转矩、起动电流、温升等），还有经济性、可靠性等方面的具体指标。这些规定和指标都将作为指导电机设计和产品验收的依据。

（3）搜集有关参考数据资料

要设计一台新的电机，必须了解和搜集原有同规格电机或相近规格电机的各种参数、性能、尺寸等，以作为新电机设计的参考，以及作为对程序编制是否正确，运行是否正确的判定。

（4）建立数学模型

在原手工程序的基础上建立尽可能更正确的数学模型，主要是对两个方面的处理要得当，一是对所有计算公式尽量在精确计算的原则下重新整理，这里包括对一些原始公式的重新推导，对经验和试验公式的重新考虑，以及放弃一些简化电路。例如：第一、放弃 Γ 形电路，而用 T 形甚至链形电路等；第二、对所有曲线与图表尽量寻求最合理的数学表达式。

（5）框图设计

电机设计程序一般均采用积木式结构，故框图往往分为两大部分，即主框与分框，而分框又包括各种子程序框和一些重点框。主框主要反映整个程序的运行结构，使设计人员和程序使用人员一目了然。而分框，一部分是各种子程序的情况，另一部分则是某些主要部分程序的运行结构情况。如图 1.3-14～图 1.3-16 所示，就分别表示异步电动机设计程序的主框、分框（子程序框与重点框）。

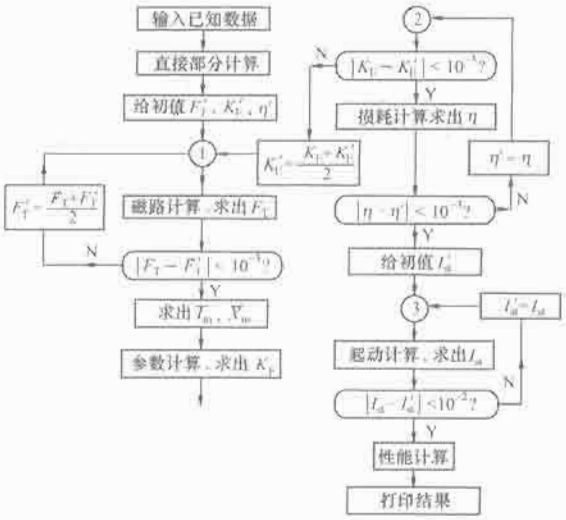


图 1.3-14 异步电动机设计程序主框图

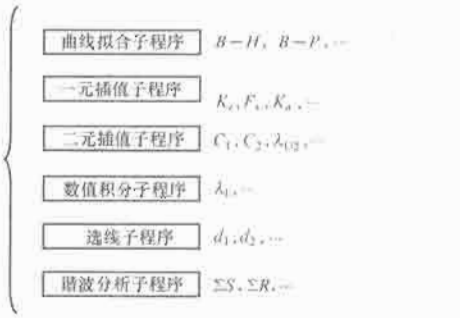


图 1.3-15 异步电动机设计程序分框（子程序框）

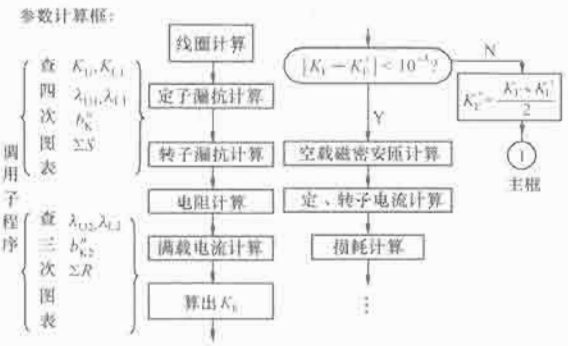


图 1.3-16 异步电动机设计程序分框
（参数计算重点框）

注：参数计算框：在框图设计中，有一个很重要的问题，就是如何处理迭代运算和防止程序运行的死循环。

（6）合理安排迭代运算、注意防止程序死循环

1）迭代计算过程的处理。在三相异步电动机的电磁设计中，饱和系数 F_T、满载电动势系数 K_E、效率 η、起动电流 I_{st} 等四个参量需要用试探迭代法计算确定。这是因为气隙和齿部磁通密度要受到饱和程度的制约。反过来，气隙和齿部磁通密度的高低又会左右磁路的饱和程度；气隙磁通和各段磁路的磁通密度要受到满载电动势系数 K_E 的制约，而由磁通密度（磁动势）所决定的励磁电流又会影响到 K_E 的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

大小；电机满载电流的有功分量 I_p 随效率 η 而改变，反之 I_p 的大小又决定了效率 η 的高低；起动电流 I_{st} 的大小决定了异步电机起动时漏磁路的饱和程度，从而影响到起动阻抗的数值。反过来，起动阻抗的数值又决定了起动电流的大小。因此在电磁设计中，应对这四个参量先假定初值（F_{T0}、K_{E0}、η_0、I_{st0}），通过若干程序行的计算以后，分别得到这四个参量的计算值（F_T、K_E、η、I_{st}）。然后采用适当的步骤把计算值与假定的初值进行比较（即框图中的判断框），当满足收敛条件（即迭代精度）时，迭代计算结束。否则，需重新给出这四个参量的再设值（即框图中的 F'_{T0}、K'_{E0}、η'_0、I'_{st0}），进行重复计算，直到满足精度要求为止。整个计算过程的工作量取决于下述三点：

①比较准确地确定迭代初值（取假定值）。基于中小型三相异步电动机已有丰富的系列设计经验，根据有关的电磁数据，可总结出如下四个经验公式，以便确定假定值的初值。

（a）F_{T0}

$$F_{T0} = 1.34 - 0.037\ln P_2 \tag{1.3-71}$$

（b）K_{E0}

对于两极小型电机

$$K_{E0} = 0.0086\ln P_2 + 0.92 \tag{1.3-72}$$

对于两极以上小型电机

$$K_{E0} = 0.0108\ln P_2 - 0.0065p + 0.931 \tag{1.3-73}$$

对于中型异步电机

$$K_{E0} = 0.0109\ln P_2 - 0.005p + 0.892 \tag{1.3-74}$$

（c）η_0

$$\eta_0 = \eta_N \tag{1.3-75}$$

（d）I_{st0}

$$I_{st0} = 2.7T_M I_{KW} \tag{1.3-76}$$

式中，P_2 为电机额定功率，kW；p 为电机极对数；η_N 为技术条件要求的效率值；T_M 为最大转矩倍数，按技术条件确定；I_{KW} 为功电流，A。

②在确定假定值的再设值时，一般可按下述规律处理。

（a）饱和系数

$$F_T = \frac{F_\delta + F_{t1} + F_{t2}}{F\delta}$$

式中，F_δ、F_{t1}、F_{t2} 分别为气隙、定子齿、转子齿磁位降。可见当假设的 F_{T0} 较小时，波幅系数 F_δ 就大，导致齿磁通密度增大，饱和系数的计算值 F_T 变大。当电机的饱和程度较低时，这种变化比较慢。而当电机的饱和程度较高时，这种变化将比较明显。因而在选择假定值的再设值 F'_T 时，应使其较接近经计算所得到的 F_T 值。F'_T 可按下列两式确定

$$F'_{T0} = \frac{F_T + F_{T0}}{2} \tag{1.3-77}$$

$$F'_{T0} = F_T - \frac{F_T - F_{T0}}{3} \tag{1.3-78}$$

（b）满载电动势系数

$$K_E = 1 - (\bar{i}_p \bar{r}_1 \ \bar{i}_R \bar{x}_1)$$

式中，$\bar{i}_p$ 为定子电流有功分量标么值；$\bar{i}_R$ 为定子电流无功分量标么值；$\bar{r}_1$ 为定子绕组电阻标么值；$\bar{x}_1$ 为定子绕组漏抗标么值。

其中 $\bar{i}_p$ 的值随 K_{E0} 的变化不大，而 $\bar{i}_R = \bar{i}_m + \bar{i}_x$（$\bar{i}_m$ 为满载激磁电流的标么值），并且 $\bar{i}_m$ 随着 K_{E0} 较小时，磁通及磁通密度较小，因而 $\bar{i}_m$ 较小，$\bar{i}_R$ 也较小，则满载电动势系数的计算值较大。反之，当 K_{E0} 较大时，则 K_E 变小。因此，在确定假定值的再设值 K'_{E0} 时可由以下两式计算

$$K'_{E0} = \frac{K_E + K_{E0}}{2} \tag{1.3-79}$$

$$K'_{E0} = K_E - \frac{K_E - K_{E0}}{\delta} \tag{1.3-80}$$

（c）效率 η'_0。效率的假定值 η_0 设得小，$\bar{i}_p$ 及 $\bar{i}_x$ 都较大，使得定、转子绕组铜（铝）损耗增加，使效率的计算值 η 偏小。反之，η_0 设得较大，则效率的计算值 η 也增大。故在确定效率假定值的再设值 η'_0 时，一般可使 $\eta'_0 = \eta_0$。或应用“过校”的办法，即若 η 比 η_0 小时，则使 η'_0 比 η 还要小一些；若 η 比 η_0 大，则应使 η'_0 比 η 更大，这样处理更有利于计算很快收敛，一般可按下面两式计算

$$\eta'_0 = \eta \tag{1.3-81}$$

$$\eta'_0 = \eta + \frac{\eta - \eta_0}{5} \tag{1.3-82}$$

（d）起动电流 I'_{st}。当起动电流 I_{st0} 设得较小时，起动时漏抗饱和系数 K_Z 变大，使得起动漏抗 X_{st} 变大，从而使起动电流的计算值 I_{st} 变小，故在重新确定起动电流假定值的再设值 I'_{st0} 时，应参照 η'_0 的处理方法，采用“过校”的方法，一般可由下面两式确定

$$I'_{st0} = I_{st} \tag{1.3-83}$$

$$I'_{st0} = I_{st} + \frac{I_{st} - I_{st0}}{5} \tag{1.3-84}$$

③合理地确定迭代精度（收敛条件）。在迭代计算中，迭代精度（收敛条件）的选择恰当与否，既会影响到计算结果的准确程度，还会影响到计算时间的长短，建议按如下原则确定迭代精度

$$|F_T - F'_{T0}| \leqslant 0.005 \tag{1.3-85}$$

$$|K_E - K'_{E0}| \leqslant 0.005 \tag{1.3-86}$$

$$|\eta - \eta'_0| \leqslant 0.002 \tag{1.3-87}$$

$$|I_{st} - I'_{st0}| \leqslant 0.01 \tag{1.3-88}$$

类似上述这样的迭代计算，在电机设计中是经常遇到的。需要注意的是，在处理这类问题时，应把迭代计算中不变的运算放在迭代之外进行，以免在迭代计算中重复计算相同的结果，而增加计算时间。

2）防止“死循环”的处理。在进行迭代计算时，如果原始数据给得不合适，无论如何迭代也达不到精度要求。碰到这种情况，计算会永无休止地运行下去，这种现象就称为“死循环”。

在迭代计算中，为防止“死循环”现象发生，最简单的措施是在程序中专门设置一些计数开关变量如 K1。每迭代一次，它自动加 1，K1=K1+1。当超过规定的次数时，便自动停止迭代而转向下一步或结束，同时打印出故障信息，以便查对。电机设计中，迭代次数一般以 50 次为限。三相异步电动机的校核计算要对电磁设计的百余个公式逐一进行计算，其中夹代着四个迭代计算。并且前面三个迭代计算（F_T，K_E，η）又是相互关联，层层嵌套的。对此，可按图 1.3-17 所示的框图进行处理。应该指出，合理地选择迭代精度是防止“死循环”的重要因素。

（7）编制源程序及其要点

在编制好程序设计框图后，便可根据电机设计数学模型及一定的计算方法用算法语言编写源程序。这是一个很细致的过程，也是很关键的一步，力求稳和准，反复推敲，不要急于求成，这样才能提高程序的质量，取得事半功倍的效果。以下就编程中的几个要点再作如下介绍：

1）关于标识符的命名原则。在编制源程序时，首先遇

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

到的问题就是要改写手算公式中的各个变量名及数组名等。目前，仅异步电机的电磁设计就有 300 多变量名，它用遍了大写、小写的英文字母，希腊字母，数字及上、下标等。而计算机操作键盘上只有 26 个英文字母和 0～9 十个数字，外加一些其他的基本符号，且书写时只允许写在一行上，没有上标和下标，也不能带撇，还有其他一些限制。使标识符的命名能既与手算公式相近，又与设计应用人员的习惯相近，建议对变量、数组及子程序的命名按如下方法处理：

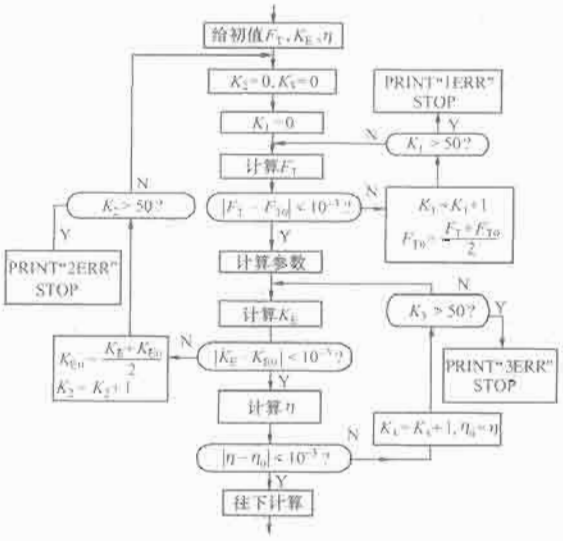


图 1.3-17 迭代计算框图

①变量名的命名：

(a) 对原用英文字母的照旧，但须全部改用大写，下标移到同一行上。如 D_{i1} 改为 DI1，b_{sk} 改为 BSK。

(b) 对原来上标带一撇的，可在原符号后加“1”代替；对原来上标带两撇的，可在符号后加“2”代替。如 I_1' 改为 I11；b_K'' 改为 BK2。

(c) 对标么值，可在原字母前重复该字母，如 $\overline{r_1}$ 改写为 RR1；$\overline{x_1}$ 改为 XX1。

(d) 对原用希腊字母的有两种处理办法：

A：用相近的几个汉语拼音或英译字母代替。

例如：原名 π Φ α η ρ …

改名 PA(PI) FA(PHI) ALFA ETA I() …

B：用英文原文的字头代替。

例如：cosφ 的原文是 POWER FACTOR，就用 PF 来代替；气隙 δ 的原文是 GAP，就用 G 来代替。

(e) 其他的部分处理，尽量在音、形上与习惯相近。如 τ_y 改用 TY，$1-\varepsilon_L$ 改用 1－EL。

②数组及子程序的命名：

(a) 对代表一条曲线或一张数据表格中各个数据的数组名称应该尽量与原意一致或接近，如 $F_T \sim F_S$ 曲线，用 FTS 表示；$g \sim b_K'$ 曲线用 GBK 表示。

(b) 对计算机程序中新出现的输入数据形成的数组名尽量取得简单一些。

(c) 子程序的名称应尽量与其内容的含义相同。

2) 关于输入数据及其分组方式。为了使输入大量的数据时有条不紊，且为了便于数据的查找、修改和调整，同时也为了有利于程序计算功能的扩展，通常将输入数据按类分组安排，然后依次输入。这些输入数据的分组一般按公用数组、不变数组和可变数组进行分类，具体说明如下：

公用数组——指常用的一些曲线，表格以及导线线规等。如 $B-H$, $B-P$, $s-d$, F_s-F_T, K_z-B_t, C_1-B, $\sum R-Q_2/P$, …。

不变数组指给定型号规格电机的有关设计规定值，如电机的主要规格参数（如 U、P_2、n、f 等）。性能指标规定值（如 η、$\cos\varphi$、T_m 等）以及不变的槽参数等。

可变数组指校核设计过程中常需调整的一些数据，如定、转子冲片，槽形尺寸，铁心长，绕组线规及匝数等。

3) 输出数据的方式与内容。电机电磁设计的全部计算结果有百余项，可以把它全部打印出来，且带符号说明。在打印输出时要排列整齐、合理、便于阅读、符合专业习惯。其输出的方式可以是文件形式、屏幕形式或文件与屏幕同时输出的形式。

输出的内容主要包括如下几个方面：

①主要结果包括：

(a) 主要尺寸与线规，如定、转子冲片尺寸和槽形尺寸，线径，线匝等。

(b) 主要性能指标，如 η、$\cos\varphi$、T_{st}、I_{st}、…

(c) 各种磁参数，如 B_t、B_y、…

(d) 各种电参数，如 I_1、I_2、J_1、J_2、A_1、…

(e) 其他参数，如 R_1、r_2'、X_1、X_2、…

(f) 各项损耗，如 P_j、P_{fw}、…

②中间结果和中间异常情况输出。

③输入的原始数据也要安排输出，为的是便于核对原始数据的正确与否。

(8) 校核设计程序框图

用 T 形等效电路计算三相异步电动机的校核设计程序框图如图 1.3-18 所示。

4.3 电机的计算机辅助“综合设计”

“综合设计”是根据已知的电机技术性能要求，让计算机自动地选择合适的技术参数与结构尺寸，从而得出若干可行方案。它与“校核设计”相比，具有以下一些特点：

1) 程序结构以循环计算为主体。

2) 由程序本身来计算、确定各设计参量的选值，故输入量较少。

3) 程序为多方案计算，即能输出给定运算范围内的全部可行方案。

4) 程序对各设计方案具有自动运算、判断、调整和挑选能力，因此自动化程度高。

5) 程序能综合考虑电机性能、成本、结构、工艺性、系列化和通用化等方面的设计要求。

综合设计按其综合能力的大小和综合方式的不同，一般可分为以下三种类型，即综合开槽设计、综合循环设计和综合调整设计。

4.3.1 综合开槽设计

综合开槽设计的简单示意框图如图 1.3-19 所示，这是综合设计的低级阶段，它仅比校核设计增加了开槽功能，且一般是单方案运算和输出，这种开槽设计程序仅具备了初步的综合能力。

关于综合设计的开槽方法可参见有关文献。这里要注意解决的是“拉锯式”的死循环问题，例如：

由定子磁通密度 B_t 开槽，如图 1.3-20 所示。

$$\begin{cases} B_t = \dfrac{\Phi_t}{S_t} \\ \Phi = K_{E1}\Phi_0 \\ K_{E1} \Leftarrow K_E' \end{cases}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

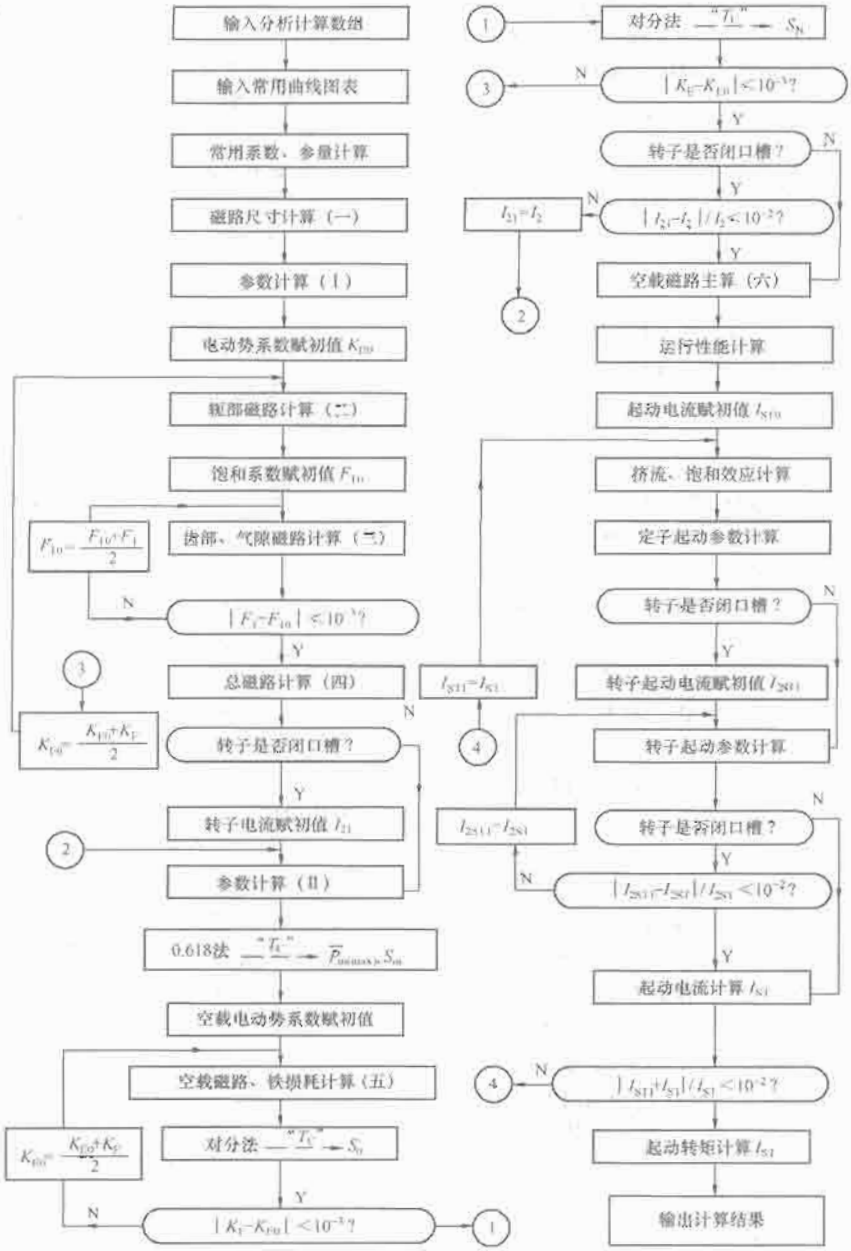


图 1.3-18　三相异步电动机的校核设计程序框（T 形等效电路）

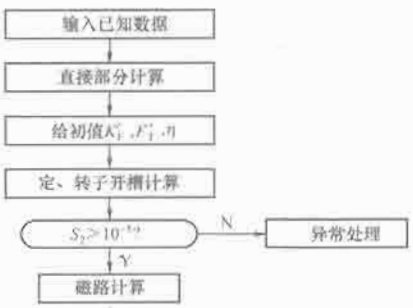


图 1.3-19　综合开槽设计的简单示意框图
S_2—槽面积

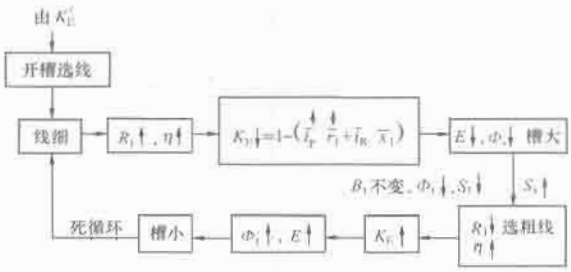


图 1.3-20　定子磁通密度开槽设计示意图

对于这种死循环解决的办法是加一个判断 K_E 变化趋势的开关变量 SW。开始时，SW＝1，当出现死循环，即出现大、小、大的情况时，令 SW＝0，去进行开槽计算，不再进行选细。

4.3.2　综合循环设计

综合循环设计程序是一种多方案运算，多方案输出的综合设计程序，是应用相当广泛的综合形式。它将电机设计中的一些主要参量作为循环变量，再利用嵌套式的多层循环语句，让计算机自动地按一定的步长，由规定的初始值逐步变化到终止值，自动淘汰无用方案，运算出一批可行方案，供设计人员选用。在综合循环设计程序的编制和运行中主要有两个问题必须注意解决，这就是循环变量的合理确定和循环的合理处理。

（1）循环变量的确定

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

综合循环设计程序的结构是由多重循环语句组成的嵌套式结构，其嵌套的层数就是循环变量的个数，而总的循环计算次数等于每个循环变量各自循环次数的连乘积，即

$$N = n_1 n_2 \cdot \cdots \cdot n_i \cdot \cdots \cdot n_m$$

式中，n_i 是第 i 个循环变量的循环次数，N 为总循环次数。假如有 m 个循环变量，每个循环变量各循环 n 次，则总的循环次数为

$$N = n^m$$

电机的设计变量有 D_{i1}、L_i、Z_1、B_t、J_1、…共 50 多，如取 50 个循环变量，每个变量循环 2 次，每个方案运行 1s 时间计算，则

$$2^{50} = 1.1 \times 10^{15}$$

也就是说计算机要不停地运算 3500 万年之久。显然这种取法是不合适的。选取循环变量一般原则如下：

1）少而精，一般小于 7～9 个。

2）优先考虑对技术性能、经济指标有重大影响的独立变量，如 D_{i1}、L_i、Z_1 等。

3）可由经验值或性能指标值推算出大致范围的变量；可为其他参量的确定提供依据的变量，如 B_{ts}、B_{ty}、B_{ys}、J_1、J_2 等。

循环变量一旦确定，其他的设计参量就当作常量处理了。

(2) 循环的处理

循环设计计算程序的结构为嵌套式，从外层向内层循环，一层层嵌套，循环运算的次序则是由内层循环依次向外层循环逐步计算。其原理性框图如图 1.3-21 所示，框图中有 5 个循环变量：定子内径 D_{i1}，铁心长度 L_i，每槽导体数 Z_1，定子齿磁通密度 B_{ts} 和转子导条电流密度 J_b。其中定子内径 D_{i1} 是最外层的循环变量，转子导条电流密度是最内层的循环变量，每一循环变量从初始值开始，从内向外逐次加一个步长（增量为正值），直到新值达到该变量的终值（最大值）为止。对这种多重循环程序，要注意以下几点：

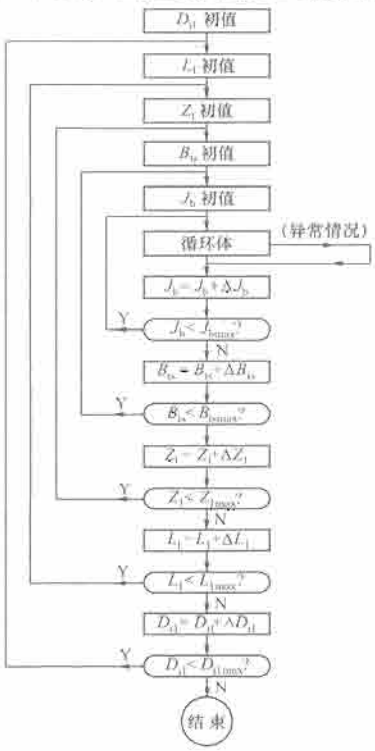


图 1.3-21 综合循环设计原理性框图

1）嵌套层次尽量少。

2）层次分明、互不交叉。

3）严格控制内循环，把不变公式提到循环体外。

4）化多重大循环为多次小循环。

例如，上述 5 个变量同时作为循环变量，且每个变量的数值变化三次，则需进行 243 次，假如计算一次需 10s，则总运算时间为 40.5min。若先将 D_{i1}、L_i 作为循环变量（Z_1、B_{ts}、J_b 视为常量）进行循环计算，再将 Z_1、B_{ts}、J_b 作为循环变量（视 D_{i1}，L_i 为常量）进行循环计算，同样使每个变量的数值也变化三次，则共需进行 $3^2 + 3^3 = 36$ 次，运算时间改为 6min。如果循环的变量和循环的次数越多，这种相差就越大。

5）合理确定循环变量初值及扫描范围。这常常是综合设计计算成败的关键。

6）及时进行逻辑判断，尽早地淘汰无用方案，通常遇到的异常情况有：①磁通密度，电流密度超出许可范围；②选线失败或槽满率太高；③槽形超出工艺许可范围；④电动势系数 K_E 太低。

4.3.3 综合调整设计

调整设计程序具有较强的自动调整电机参数的功能，在多方案运算中，它是根据设计方案满足性能指标程度的不同，利用条件转向语句来实现电机参量的调整。其调整的步长大小和正负，是在把设计方案的计算值与规定值经逻辑比较后，由计算机自动确定的。一般来说，综合水平较高的程序比较复杂，对这种程序事先要对各参量之间的相互影响作用，各性能影响程度的强弱，都要作周密而细致的分析、比较，然后在程序中作全面的考虑和安排。

图 1.3-22 为综合调整设计框图。

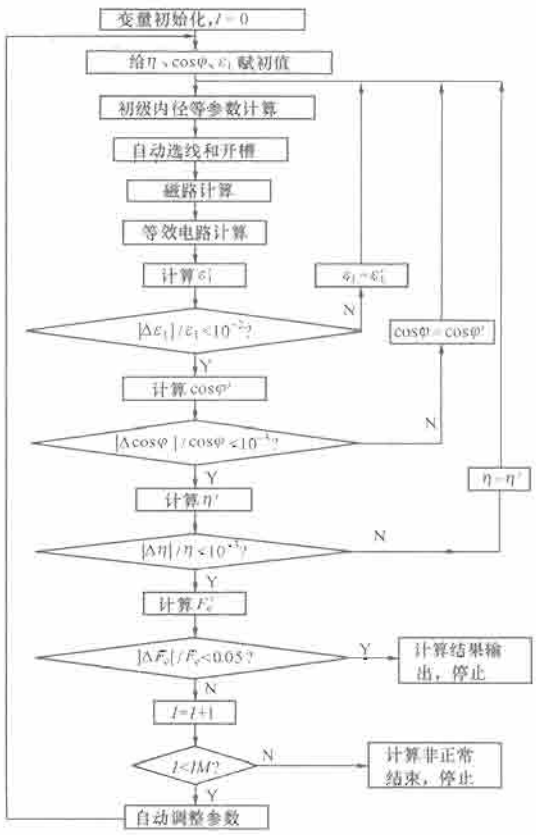


图 1.3-22 综合调整设计框图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4.4　电机 CAD 数据库与专家系统

4.4.1　电机 CAD 数据库的功能与设计步骤

电机，特别是中小型电机，是一种量大面广、通用配套的机电产品，它有 100 多个系列、几千个规格，每个规格有几百个零部件，这些零部件的几何数据就有几千个。此外，在设计中还要涉及电磁参数数据、各种试验数据、各种材料数据、各种标准数据等，每个规格的数据就是以万计。因此为了提高软件的使用效率，有效实现电机设计各部分数据共享与数据流的自动传递，迅速而准确地处理、获取这成千上万的数据，只有利用数据库系统来实现。电机数据库的基本功能有以下几点：

1）查询功能。用户可以输入一系列查询条件的组合，从数据库中检索出自己所需的电机的方案。

2）更新功能。用户可以对数据库进行添加、删除、修改记录的操作，淘汰无实用价值的方案，存储新的设计方案。

3）生成初始数据的功能。用户可以利用数据库的数据迅速地生成进行电机方案校算和优化设计的初始数据，用户只需在此基础上进行修改即可，而无需键入大量的初始数据。

4）存储绘图输入数据。用户在完成一个设计，得到一个满意的设计方案后，可将该方案存进数据库中，数据库会自动把相应的绘图参数存入相应的表中，绘图时只要从相应表中选取所需的记录，即可绘制出所需的工程图样。

电机数据库设计的具体步骤一般分为以下几个阶段：

1）需求分析。需求分析是整个数据库设计的第一个阶段，其主要目的是确定系统的目标，收集系统数据及处理。

2）概念结构设计。概念结构是各种数据模型的共同基础，它是一种概念级的结构模型，比数据结构更独立于机器，更加抽象，从而更稳定。概念结构能够充分地反映现实世界，易于为不熟悉计算机的工程设计人员所理解，易于改动，很容易向具体的数据模型转化。概念结构设计是整个数据库设计的关键。

3）逻辑结构设计。由于逻辑结构独立于任何一种数据模型的信息结构，逻辑设计的任务就是把概念结构转换成与选用的数据模型相符合的过程。

4）数据库的物理设计。数据库的物理设计就是对给定的逻辑数据模型选取一个最适合应用环境的物理结构的过程。数据库的物理结构是指数据库在物理设备上的存储结构的存取方法，是完全依赖给定计算机系统的。

下面以上海电器科学研究所完成的中小型异步电动机数据库系统设计为例加以说明。

4.4.2　基本思想

根据中小型电机产品和 CAD 系统的特点，数据库设计的基本思想是：

1）以数据库为中心，支持 CAD 系统中四大产品设计系统（即中型、小型、笼型和绕线转子四类异步电动机产品）。以并行方式与各产品设计系统中的应用软件相协调，灵活发展。

2）以四大产品为龙头，按国内外产品样本、标准、材料和图形数据分类，建立有交互式和检索型功能的设计综合数据库。

4.4.3　逻辑设计

（1）模式构造

电机 CAD 系统所涉及的数据非常庞大繁杂，必须按一定的原则分类组织。与 CAD 系统中四大产品的设计系统相对应，根据数据库用途在逻辑上和物理上可分割的特点，将中小型异步电动机数据库分成如下 15 个数据库模式，见表 1.3-1。

表 1.3-1　中小型异步电动机综合设计数据库中各数据库模式名

序号	数据库模式	代号
1	定子散嵌绕组笼型转子异步电动机国内产品数据库	RCPDT
2	定子散嵌绕组绕线转子异步电动机国内产品数据库	RWPDT
3	定子成型绕组笼型转子异步电动机国内产品数据库	PCPDT
4	定子成型绕组绕线转子异步电动机国内产品数据库	PWPDT
5	定子散嵌绕组笼型转子异步电动机国外产品样本数据库	RCFRPDT
6	定子散嵌绕组绕线转子异步电动机国外产品样本数据库	RWFRPDT
7	定子成型绕组笼型转子异步电动机国外产品样本数据库	PCFRPDT
8	定子成型绕组绕线转子异步电动机国外产品样本数据库	PWFRPDT
9	异步电动机中国标准目录数据库	CHSTD
10	异步电动机国外标准数据库	INNASTD
11	电磁材料数据库	EMLM
12	硅钢片材料数据库	MAGM
13	绝缘结构材料数据库	ISM
14	特殊环境条件下电机防护技术数据库	HJ
15	图形数据库	DRAW

（2）层次设计

上述 15 个数据库模式所包含的关系数不相同，甚至相差悬殊。例如 RCFRPDT 和 CHSTD 这 2 个数据库，前者包含 160 个关系，后者仅含 8 个关系。对于后者，通过一个菜单采用并行查询法即可；而对前者，160 个关系无法在一个菜单上显示，且不同防护型式、不同国家公司的样本组合在一起，层次不清，容易混淆。因此，有必要将关系按不同的防护型式和公司分类组合，构成数据库模式的子集，见表 1.3-2。

表 1.3-2　定子散嵌绕组笼型转子异步电动机国外产品样本数据库分类子集

序号	分类子集
1	IP44 电机公司分类样本数据
2	IP44 电机按性能分类样本数据
3	IP23 电机按公司分类样本数据

从分类子集层直接查询关系仍然是不方便的。例如 IP44 电机按公司分类的样本数据子集含有 14 个公司的样本，其中有几个公司尚有不同年代的几个样本，每一样本下含有多个关系。该子集共含有 100 个关系。因此，有必要在分类子集与关系之间安排一个层次，在该层次上，可直接查询某公司某一年代样本中的某一性能关系数据。

（3）关系描述

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

关系实质上是一张二维表，如同汇总表、型谱表等。但按照规范化理论，并非任何一张表都能定义成一个关系。有些关系存在插入、删除异常，修改复杂，数据冗余等毛病。寻求解决这些问题的办法，就是规范化的目的。

在对众多个关系进行描述时，对各类数据库，根据其工作特点，提出不同的规范化要求，如采用1范式～3范式分解等规范化技术，力求减少冗余，尽量做到数据共享。对建立的527个关系，还规定了对同一类关系采用前、后缀统一命名的原则来定义关系名，确保关系名的唯一性和易识别性。此外，根据查询用数据和应用软件的输入输出数据所具有的不同特点，采用不同的关系描述方式。如查询用数据以减少数据冗余为基本原则，对CAD系统设计的支撑数据采用减少系统调库时间，提高运行效率为原则等。因此，尽管一些软件的输入数据多且重复数据多，但为减少系统运行的总体时间，一般不将一个输入数据关系拆成几个关系。因为系统打开多个较少属性的数据关系表的时间比打开一个多属性的数据关系表的时间多很多。

4.4.4 系统内容

与表1.3-1所述的15个数据库模式相对应，建立了15个数据库分系统，简要介绍其主要内容如下：

（1）国内产品数据库分系统（共4个）

各分系统包含基本系列和部分派生系列产品。其中：

1）定子散嵌绕组笼型转子（简称RSCR）电机：含Y系列（IP44）、Y系列（IP23）、YH系列高转差率、YX系列高效率和YD系列变极多速异步电动机等部分派生系列。

2）定子散嵌绕组绕线转子（简称RSWR）电动机：含YR（IP23）电机。

3）定子成型绕组笼型转子（简称PSCR）电动机：含低压Y系列（IP24）、Y系列（IP23）和高压Y系列（IP23）电机。

4）定子成型绕组绕线转子（简称PSWR）电机：含高、低压YR（IR23）电机。

在各系列产品数据库子系统下，包含了如下几类数据：

1）产品的主要性能标准数据。为各产品技术条件规定的型谱、效率、功率因数、堵转电流与转矩、最大与最小转矩、噪声限值和容差等数据。

2）安装尺寸和外形尺寸数据。

3）电机的各种公差数据。其中包括轴伸键、键槽、轴伸长、轴线、底脚支承面和凸缘止口等的形状与位置公差。

4）电机试验数据。由国内20多家电机厂提供的近千台样机试验数据。包括电机的各项性能、损耗、电流、温升、噪声和振动数据。整理出各试验值的最大、最小和平均值，并附有标准和设计数据对比，为考核电磁计算精度、分析计算误差变化趋势和减少设计裕量提供依据同时为新开发的温升、噪声、起动性能计算应用软件的验证和修改提供了参考，具有一定的覆盖面和实用价值。

5）各应用软件的输入输出数据。

①电磁计算输入数据，收集了国内20世纪七八十年代开发的4大产品8个系列300多个规格的电磁设计数据，既可作为开发新产品参考之用，又可作为电磁计算的初始方案。

②电磁计算输出数据，电磁计算是进行通风温升、噪声、起动时温升应力计算的结构设计及绘图的基础。这些应用软件的输入数据有许多来源于电磁计算的结果。因此，电磁计算输出数据不仅包括性能汇总数据，还包括供其他应用软件共享的公共数据、绘制定转子冲片的尺寸数据等。

③其他应用软件的输入数据，除从共享的公共数据库中得到部分数据外，还有供各软件计算的特有数据。

输入输出数据为CAD系统的设计支撑数据。由于所收集的数据具有一定的代表性、先进性和产品覆盖面广，从而为CAD系统提供了丰富的数据资源。随着数据的不断更新丰富，这些统计模型将更趋完善合理，并进一步提高CAD水平。

6）主要结构、材料和常用公差数据。包括主要零部件各结构部位的尺寸及公差、尺寸精度和表面粗糙度；各结构部位相应于某基准部位的形位公差；电机常用材料的用途、牌号和常用规格；电机设计所需的常用形位公差值和公差带。这些数据对于新产品的结构设计有很好的参考价值。

国内产品数据库内共有172个关系（表格），总数据量约43万。数据库内数据全面系统，产品涉及的类型广泛，覆盖面广，所采集的数据具有代表性、先进性和准确性。

（2）国外产品样本数据库分系统

收集了代表国际先进水平的国外公司，如德国西门子和AEG、德国和瑞士BBC、美国GE和西屋、日本日立、日本东芝等公司的产品样本数据。其中RSCR（IP44）电机共14个国外公司的样本；RSCR（IP23）电机共7个国外公司的样本；RSWR（IP23）电机共4个国外公司的样本；PSCR电机共4个国外公司的样本；PSWR电机共2个国外公司的样本。数据库内共含220个关系（表格），总数据量约为32万，先进工业国家的产品样本有助于了解国际水平和发展趋势，也为我国电机行业赶超世界先进水平、产品打入国际市场提供了技术依据。

（3）标准数据库分系统（共2个）

1）中国标准目录数据库。包括国内中小型电机产品的基础标准、方法标准、零部件标准、质量分等标准和产品标准的标准名、标准号、发布年份、基本内容，为国内电机的通用标准目录库。

2）国外标准数据库。收集了在西欧市场具有代表性的德国DIN标准以及美国国家标准ANSI-NEMA标准的最新（1989年）资料，因而代表国际先进水平。资料内容丰富。如NEMA包括不同的设计字母（A、B、C设计），不同的电压（380V/230V），不同的频率（50Hz/60Hz），不同的电机型式（开启式、封闭式笼型转子和绕线转子）情况下电机的主要性能指标、型谱、交流电机的主要性能指标、电机尺寸、机座号、设计字母的含义等。为便于对照比较，还列出了NEMA标准与国内标准尺寸符号含义对照和NEMA机座号与国内标准中心高的对应关系表。

标准数据库内共含47个关系（表格），总数据量约为7.1万。

（4）材料数据库分系统（共3个）

1）硅钢片材料数据库。包括国内部分冷、热轧硅钢片的钢号、主要应用范围、电磁和机械性能、磁化曲线和铁损耗曲线数据以及和国外硅钢片的电磁性能对照表。

2）电磁线材料数据库。包括中小型异步电动机定、转子绕组使用的漆包圆线、扁铜线产品的名称、型号、技术参数和标称尺寸等。

3）交流电机绝缘结构。目前收集了低压（600V、1140V）定子散嵌绕组B级、F级的绝缘结构以及评定试验数据，材料数据库内共含关系（表格）18个，总数据量为3.4万。

（5）特殊环境条件下电机防护技术数据库

由广州电器科学研究所所承担的75—52—03—02/17分

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

专题提供数据。该分专题将中小型异步电动机按自然或工业环境（即热带、温热、干热、户外、化工、粉尘、高温、和低温等）进行分类分级，为用户提供有关中小型异步电动机在特殊环境条件下的有关防护技术和材料选用。由上海电器科学研究所负责将存储在 dBASE 数据库中的数据移植到中小型异步电机设计综合数据库中，并编制管理程序。该数据库中内容丰富、实用，共含 55 个表，总数据量为 12 万个。

（6）电机主要零部件参数化绘图数据库

上海电器科学研究所在 Apollo 公司的 DN3000 工作站上配置了 DDM 绘图软件，对电机的主要零部件图样采用 DAL 语言调用绘图命令进行参数化设计。因此，可在 MICRO VAX Ⅱ上建立全部参数化绘图程序所需的若干个 ORACLE 关系型数据库，通过以太网将从数据库中调出的记录，传输到 DN3000 工作站相应目录下并实时绘出电机零部件图。数据库存放 RSCR（IP44）电机的定、转子冲片，定子端板，铸铝转子，定子铁心和转轴的参数化绘图数据，机座号从 H80～280，共 10 张表格，可绘制 126 张图样，数据量为 1.75 万。

中小型异步电动机设计综合数据库为一大型数据库系统，系统中共含 527 个关系（表格），总数据量约为 123 万。

4.4.5 电机设计专家系统

专家系统（Expert System）作为人工智能的一个重要分支，被广泛地应用在许多领域，已发挥了巨大的作用。国内外学者近几年来应用专家系统进行电机智能 CAD 的研究取得了一定的进展。

电机设计专家系统由电机设计与专家系统两个方面组成，专家系统指导电机设计，电机设计计算的结果反馈给专家系统分析评价，但专家系统只是局部地参与电机设计过程，专家系统具有一定的局限性，它仅模拟人类专家解决问题的某些功能，如逻辑推理、抽象思维等。而对于形象思维、直觉、经验联想、灵感等则较难模拟。但在电机设计中，比较常用的有类比、联想、经验等。例如，在实际设计中经常采用类比法来确定主要尺寸。针对电机设计的特点，有文献提出了一种智能 CAD 神经网络专家系统的结构。因为神经网络具有分布并行、自组织、自联想、容错性等特性，比较适合于形象思维、直觉、经验、联想和类比的模拟，它与专家系统具有较强的互补性。因此，集成神经网络和专家系统建立智能混合系统，已成为新一代智能系统的发展趋势。将人工神经网络应用于电机设计专家系统。用基于神经网络的类比法确定电机的主要尺寸，同时采用了带有可调参数的多层神经网络—并对 BP 学习算法进行改进。实践表明，该方法是成功的。

基于神经网络的类比法由以下步骤实现：

1）收集设计和制造中积累的经验数据，作为神经网络的训练样本和测试样本。

2）确定神经网络的结构，如层数以及输入层、隐含层和输出层各层的神经元数目。

3）用训练样本和神经网络的学习算法训练网络。

4）用测试样本检验神经网络，若不满足要求，则采用不同的网络初始化参数返回步骤 3）或返回 2），重新确定网络结构。这样，训练好的神经网络即可实现用类比法确定主要尺寸。当输入一个新的电机数据时，尽管它可能不在训练样本和测试样本中，但神经网络可以通过泛化（Generalization）得到主要尺寸。这实际上也就是类比法的思想。

对于小型三相异步电动机（IP44），基于神经网络的类比法的具体实现如下：

1）收集 Y 系列（IP44）小型三相异步电动机共 82 个型号的数据，其中 70 个作为训练样本，12 个作为测试样本。

2）对于 Y 系列（IP44）小型三相异步电动机，神经网络的输入层有 9 个神经元，分别对应于额定功率、额定电压、额定转速、效率、功率因数、最大转矩倍数、起动转矩倍数、起动电流倍数和热负荷；输出层有 7 个神经元，分别对应于定子外径、内径、铁心长度及气隙尺寸、转子内径、定子槽数和转子槽数。

3）应用 70 个样本和学习算法训练神经网络。

4）应用 10 个测试样本检验神经网络。该系统运行时，首先由用户输入电机的额定数据和技术指标，然后通过神经网络类比法初步确定主要尺寸。

4.5 电机设计的最优化技术

4.5.1 最优化的数学模型

电机优化技术是最优化数学方法加上计算机技术在电机工程中的应用。

利用最优化原理，人们只要把注意力集中于一个使目标数量化，并能度量决策特性的目标函数上，就能解决涉及对很多有内在联系中的变量进行选值的复杂决策问题。在限制决策变量取值范围的约束下，使这样一个目标函数取得最大值（或最小值，由其数学描述方式而定），那么不论是对于一笔生意的盈亏，还是对于一个大型电网络设计中参数的选择，不论是对政府计划中的综合决策，还是对物资调配和交通运输问题等，最优化方法都可以提供一个比较满意的结果。

当然在处理一个复杂的决策问题时，要把所有参数的内在联系、约束条件以及相应的目标等复杂情况完全表示出来，那是少有的，而且也是很难办到的。因此，如同所有的定量分析技术一样，一个具体的最优化数学描述，只能看作是一种近似的描述。问题的关键为数学描述的正确性如何，是否抓住了主要的因素。

最优化方法是应用数学的一个重要分支。从数学上说，是一种求极值的方法。现代最优化方法与计算机分不开，实际上已经成为计算机寻优的方法。

最优化方法的第一步是要建立待求问题的数学模型，其中包括确定变量和约束条件，建立目标函数等。

变量是指最优化问题中待确定的某些量（参数），可以是一个、两个或多个。例如，交流电机优化设计中变量可能是定子内、外径，铁心长度，气隙磁通密度等。

如果有 n 个变量，一般表示成 x_i（$i=1,2,\cdots,n$）；或用一个 n 维向量

$$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_n]^{\mathrm{T}}$$

来表示。式中 x_i 看作向量 $\boldsymbol{X}$ 的第 i 个分量。n 维向量的全体，称为 n 维向量空间。

目标函数 $f(X)$ 则是“最优化”的评定标准或评价方法。例如，电机、电器等电工设备的优化设计，其目标可取为选择一组电磁参数和几何尺寸，在满足性能要求下，使电工设备的体积最小，或重量最轻，或投资最少。这里设备的体积、重量或投资最小，就可以表达为目标函数 $f(X)$ 取极值，即求 $\min f(X)$；而满足性能要求的前提，则是作为约束条件提出来的。

约束条件可以是等式约束，或不等式约束，或两者兼有之。有些问题是没有约束的。例如，电网络设计中常常要求选择网络元件参数，在满足电路平衡方程式的前提下，使网络消耗的功率最小。这里电路平衡方程式就是一种等式约束

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

条件。又如上面指出的满足电机性能要求的限制，就是一种不等式约束条件，例如，电机效率不低于 90%，功率因数不低于 0.88 等。

由上可见，目标函数 $f(X)$ 可以是效果函数，也可以是费用函数。用效果作为目标函数时，最优化问题要求极大值，这时费用函数不得超过某个上界成为最优化问题的约束。反之，目标函数是费用函数时，问题变成了求极小值，而效果函数不低于某个下界则成为约束条件了，所以这二者是对偶关系。

从求解的角度而言，目标函数求极大值和求极小值没有什么原则区别，因为求 $f(x)$ 的极小值，相当于求 $-f(x)$ 的极大值

$$\min f(x) = -\max[-f(x)]$$

二者极值点均为 $x = x^*$。

综上所述，可以把最优化的数学模型统一写成

$$\min_{X \in R} f(X)$$

$$R = \{X \mid g_j(X) \leqslant 0, j = 1,2,\cdots,m\} \quad (1.3\text{-}89)$$

式中，$X = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^T$；$R$ 可以看作是 n 维欧氏空间中被 m 个约束条件限制的一个可行解域。等式约束 $g(X) = 0$ 等价于 $g(X) \geqslant 0$ 和 $g(X) \leqslant 0$，故等式约束归并到不等式约束中去。不等式约束 $g(X) \geqslant 0$ 可等价写成 $-g(X) \leqslant 0$。故式（1.3-121）有通用性。

设

$$X^* = [x_1^*, x_2^*, \cdots, x_n^*]^T \in R$$

若对任意 $X \in R$，都有

$$f(X^*) \leqslant f(X)$$

则称 X^* 为规划问题式（1.3-89）的最优解。

4.5.2 最优化问题的分类和求解方法

（1）分类

由于目标函数和约束条件的性质不同，最优化问题被分成若干类。

当 $f(X)$ 和 $g_j(X)$ 全部为线性函数时，称为线性规划（或线性最优化）；当 $f(X)$ 或 $g_j(X)$ 中有非线性函数时，称为非线性规划（或非线性最优化）。

若目标函数 $f(X)$ 为二次函数，约束条件 $g_j(X)$ 为线性函数时，称为二次规划。

如果最优化问题的解不随时间而变，则称为静态规划。前面所提到的电机与电工设备的优化设计问题，就是静态最优化问题。如果最优化问题的解随时间而变，即解向量是时间 t 的函数，则是属动态规划问题，也就是最佳控制问题。一切受控过程中都有一个最佳过程控制问题，也就是都存在一个动态最优化问题。

实际上遇到的许多规划问题，都可以按时间分割为若干有相互联系的阶段，对每一个阶段都要做出决策，上一个阶段的决策会影响当前和以后各阶段的决策。寻求这种多阶段决策过程问题的最优解也是动态规划问题的一个重要内容。

此外，还有整数规划、几何规划、离散规划和网络最优化等。本书重点介绍与电机工程优化有关的线性规划、非线性规划和离散规划等。

（2）求解方法

最优化问题的求解方法，实质上就是求最大值（或最小值）的快速计算法。已有的求解方法很多，有些方法还在不断发展和完善中。从大的方面可归类如下：

1）解析法。又称间接法。这种方法只适用于目标函数和约束条件有明显表达式的情况。它在求解函数极值问题时，一般需要利用函数的导数，或用变分法求出必要条件，将问题简化。

2）直接法。这是一种数值计算方法。当目标函数较复杂，或不能用变量的显函数表达时，无法用解析法求导数得到的函数取极值的必要条件。这时，只得直接利用函数值对已搜索到的点进行比较，使搜索点的函数值不断得到改善，经过若干次迭代计算后找到最优点。

直接法不要求目标函数具有好的解析性质，所以适用范围广，求解的成功率高，这是它的优点。但正因为直接法没有利用函数的解析性质（主要是函数的导数），当然收敛速度较慢，计算时间较长。

直接搜索法有一维搜索和多维搜索之分。一维搜索是优化方法中最简单又最基本的方法；进行多维搜索多变量目标函数的极值时，多数要用到一维搜索。故一维搜索是直接搜索法的基础。多维搜索的实质也是利用已有的信息，通过空间点的移动、比较、逐步改善目标函数法，最后达到最优点。

3）以解析法为基础的数值计算法。这类方法也是一种直接搜索法，是一种解析与数值计算相结合的方法。

此外，最优化方法还可按有无约束条件区分为求约束极值方法和求无约束极值方法两大类。大多数实际优化问题，都是有约束条件的，但无约束求极值方法是最优化方法的基础。解有约束条件的最优化问题时，也同样要用到无约束求极值的方法，但必须给解域加上某些限制，确保得到的最优点落在可行域内。还有一种求约束极值的方法是将约束极值问题转化为等价的无约束极值问题来处理。

电机优化设计采用的优化算法是一种基于设计变量可微性的数值方法，主要有直接搜索法和随机搜索法两种寻优模式，其中经典寻优策略有 Powell 法、单纯形法、SUMT 罚函数法、可变容差法和梯度法等，并且已经在电机新产品的优化设计方面取得了一定进展。

20 世纪 90 年代以来，模拟退火（SA）、遗传算法（GA）、禁忌搜索（TS）和模拟进化（SE）等现代启发式优化算法得到迅速发展。为了进一步提高电机设计水平，电机工作者开始着手研究这些新型最优化理论与电机设计技术的结合与交叉，并逐步形成了能够实现全局最优的现代电机优化设计技术。

（3）变量和约束

为了方便起见，拿普通中小型异步电动机优化设计来说明，其原则对其他电机同样适用。

1）确定设计变量原则。

①设计变量应是独立的。因为数学规划是定义在 n 维欧氏空间的，要求各变量是相互独立的。故电机各个结构参数和电流密度、磁通密度等，虽然均可作为自变量，但是有一些参数却不能同时选为设计变量。例如，选定异步电动机每槽导体数 Z_1、铁心长度 l、定子内径 D_{i1} 为设计变量，对于每一组已知的 Z_1、l、D_{i1} 值，气隙磁通密度 B_δ 基本上随之确定，故不应再选择 B_δ 为设计变量了。

②变量选取的合理与否，对优化质量影响很大，循环变量选取方法可参见本章 4.3 节。

2）变量取值范围。变量的取值范围应受到限制，亦是一种约束。电机中许多尺寸由于结构和工艺的限制，都有一定取值范围。一个有经验的工程技术人员凭借经验可以大大缩小变量的寻优区间。对于有把握的变量，其变化区间可取得小些；对于把握不大的，区间就应放宽。

在确定了各设计变量的变化区间之后，变量空间是指以独立变量为相互垂直的轴，以各变量区间上下限为界所形成的一个多维封闭空间，称之为变量探索空间。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

如果只有两个变量，其上下限分别为

$$a_1 < x_1 < b_1 \quad a_2 < x_2 < b_2$$

则变量探索空间就是一个有界的平面矩形，如图 1.3-23 所示。

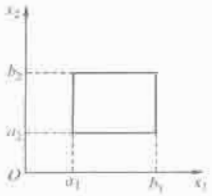


图 1.3-23　二维探索空间

如果有三个变量，变量探索空间就是个像火柴盒子的三维封闭长方体，变量空间的任意一点 P，代表了一个设计方案。故设计方案也可以用该点与坐标原点连接的空间矢量 $\overrightarrow{OP}$ 表示。它在各坐标轴上投影即为该设计方案所对应的独立设计变量值。

事实上，由于结构工艺要求，电机中许多结构尺寸都不是连续的变量，例如以毫米为长度单位时，定子的内、外径都要取整数，而铁心长度还要求以 0 或 5 为尾数；又如每槽导体数也要求为整数；双层绕组中，常常还希望每槽导体数为偶数。因此，严格说来，电机优化设计中的变量既有连续的，又有离散的，而且离散程度（疏密度和均匀度）又各不相同，故优化设计问题属混合离散规划。

对于以上含有离散变量的规划问题，可表示成下列形式

$$\begin{aligned} &\min f(X) \\ &\text{s.t.} \quad g_j(X) \leqslant 0 \quad (j=1,2,\cdots,m) \\ &\qquad a_i \leqslant x_i \leqslant b_i \quad (i=1,2,\cdots,n) \\ &\qquad x_k = z_k \quad (k=1,2,\cdots,l) \end{aligned} \tag{1.3-90}$$

式中，l 为离散变量个数，$l<n$；z_k 为第 k 个变量的整数集或离散数的集合。

这种混合离散规划问题，对于离散量应该先离散后进行优化，而不应倒过来先按连续量，作优化后再离散。

3）设计变量的标准化处理。工程设计中，各设计变量的数量级常常相差很大，例如电机电磁设计中气隙磁通密度通常是零点几特斯拉，而气隙长度则是零点零几厘米。若均采用真实值，显然计算误差对数量级小的变量影响很大，从而造成失真。

如果对变量进行标准化处理，例如将变量的探索空间化为 0～1 之间的数值，则可采用统一的寻优步长，也可保证相同的计算精度。这还会给优化程序编制带来方便。

设 l_i 和 u_i 是第 i 个变量 x_i 的下限和上限，则其间任意一点 x_i 对应的标准值

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - l_i}{u_i - l_i} \tag{1.3-91}$$

由于 $l_i \leqslant x_i \leqslant u_i$，故 $0 \leqslant \bar{x}_i \leqslant 1$，经过优化后求得 $\bar{x}_i$，可利用下式返回成真实值

$$x_i = l_i + \bar{x}_i(u_i - l_i) \tag{1.3-92}$$

4）约束条件的处理。电机优化设计中的约束，可分为结构约束和性能约束两类。以上提到的变量的上、下界和变量的离散要求等，均属结构约束，可以在程序中直接处理的。例如，按虎克-杰夫法寻优，并选每槽串联导体数作设计变量时，只要将其初值和步长均选为偶（整）数（对双层绕组言）或整数（对单层绕组言）就行了；也可以通过取整函数来处理。性能约束对于通常的中小型异步电动机言，包括效率 η、功率因数 $\cos\varphi$、最大转矩倍数 T_m、起动转矩倍数 T_{st}、起动电流倍数 I_{st} 和热负荷（或温升）等六项指标。它们和设计变量之间的关系是个复杂的函数，不能直接处理，所以用罚函数法来考虑比较方便。除此之外，还有一类参数约束，例如规定齿磁通密度 $B_z<2\text{T}$，这是为了避免那些没有意义的迭代计算。因为 $B_z>2\text{T}$ 一般不可能得到好方案。

（4）电机优化设计中的罚函数

罚函数法的增广目标函数中的罚函数项的正确选取，对优化设计的效果影响很大。注意罚函数

$$\delta(X) = \sum_{j=1}^{m} \delta_j(X)$$

可以看到，$\delta_j(X)$ 可有多种函数形式。由于 $\delta_j(X)$ 的表达式不同，而形成许多罚函数法。其目的不外乎是为了给违反约束的迭代点以一定的“惩罚”。对于电机的性能约束 $g_j(X) \leqslant 0$ 所对应的罚函数 $\delta_j(X)$，比较典型的有下列几种函数关系，如图 1.3-24 所示。

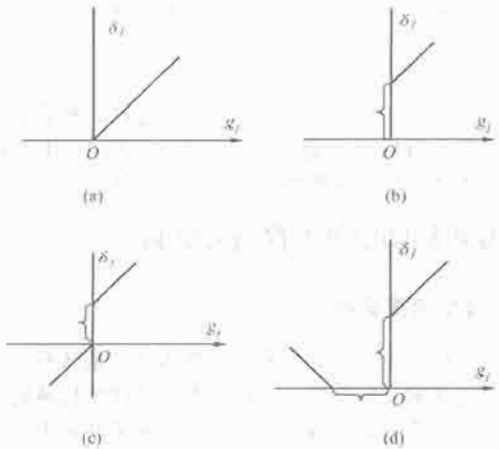


图 1.3-24　罚函数形式

1）图 1.3-24（a）的罚函数

$$\delta_j(X) = \begin{cases} 0 & g_j(X) \leqslant 0 \\ kg_j(X) & g_j(X) > 0 \end{cases}$$

上式中 k 为任选的比例系数。这样选择的罚函数说明，满足约束时，不给惩罚；不满足约束时，给以惩罚，其惩罚量可由系数 k 来控制。例如，异步电动机优化设计中，起动电流的标准约束可作这样处理。

2）图 1.3-24（b）的罚函数

$$\delta_j(X) = \begin{cases} 0 & g_j(X) \leqslant 0 \\ \delta_0 + kg_j(X) & g_j(X) > 0 \end{cases}$$

与图 1.3-24（a）不同之处在于刚违反约束时，惩罚量有一较大的突变量 δ_0。这相当于 SUMT 内点法的障碍物（或围墙），阻止寻优越出可行区。一般的性能约束均可按此法处理。如果选 $k=0$，则违反约束的惩罚量为常量，这对于处理一些结构、工艺上的约束条件比较合适。例如，齿宽太窄，为冲模工艺所不允许，就可令 $k=0$，且 δ_0 为很大数值。

3）图 1.3-24（c）的罚函数

$$\delta_j(X) = \begin{cases} -k_1 g_j(X) & g_j(X) \leqslant 0 \\ \delta_0 + k_2 g_j(X) & g_j(X) > 0 \end{cases}$$

式中，k_1、k_2 为比例常数。与图 1.3-24（b）不同之处在于 $g_j(X) \leqslant 0$ 时，惩罚量为负值，即满足条件时，不仅没惩罚，还有奖赏。所以这种罚函数，又称赏罚函数，而比例常数 k_1 则称赏罚系数。

在高效率异步电动机的优化设计中，效率的标准约束可作这样处理，因为它有利于尽可能提高电机的效率。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4）图 1.3-24（d）的罚函数

$$\delta_j(X)=\begin{cases}k_1[\Delta g-g_j(X)] & \delta_j(X)\leqslant\Delta g(\Delta g<0)\\ 0 & \Delta g<g_j(X)\leqslant 0\\ \delta_0+k_2 g_j(X) & g_j(X)>0\end{cases}$$

该罚函数的特点为当 $g_j(X)\leqslant\Delta g$ 时，不但没有奖赏，反要受到一定的惩罚。例如，矿用刮板运输机要求异步电动机具有很大的起动转矩倍数（$T_{st}=3\sim3.3$），但起动转矩太大了，可能造成链条的机械损伤，甚至断链，所以又不希望它超过某上界。这时，就可以按这种方法处理起动转矩的标准约束。

利用图 1.3-24（c）赏罚函数的方法，还可以方便地解决某些多目标的优化问题。例如，一方面要求所设计的电机体积尽可能小，另一方面又希望效率尽量高些，这一矛盾可以用适当选取的赏罚系数来协调。如果原来电机优化设计的目标是希望电机体积最小，约束是电机效率不低于某控制值，利用赏罚函数法，可以作如下的转化：预先取定一个最大允许体积 V_{max}，把原来的目标函数 $V(X)$ 写成一个附加约束条件

$$g(X)=\frac{V(X)-V_{max}}{V_{max}}\leqslant 0$$

按图 1.3-24（c）取适当的赏罚系数 k_1 与 k_2，然后让效率最高作为寻优的目标加入增广目标函数 $P(X,A)$ 中，再求极值。只要赏罚系数选择得当，其寻优结果同样有效。

5 计算机辅助电机工程图的绘制

5.1 计算机绘图基础

生产图样是作为设计成果的最终体现，是联系设计与制造这两个方面的一座桥梁。所以绘图也是计算机辅助设计的一个重要组成部分，通常这一部分所花的劳动量更多。计算机绘图取代了人工绘图的繁重劳动，从而使计算机辅助设计和计算机辅助制造两个过程联系起来了。图 1.3-25 表示了设计、制图、生产一体化系统。



图 1.3-25 设计、制图、生产一体化系统

计算机绘图的主要研究任务是如何用计算机来处理和绘制工程图纸。具体内容有：

1）图形输入。研究如何把要处理的图形输入到计算机内，以便让计算机进行各种处理。

2）图形的生成、显示和输出。研究如何利用图形在计算机内的表示方法使其在显示屏上显示图形和在打印机、绘图机等输出设备上输出图形。

3）图形处理所需的数学处理和算法。这里就包括图形变换（主要是几何形状的变换，如透视变换和开窗变换）、图形的组合、分解和运算（包括把简单图形组成复杂图形和把复杂图形分解为简单图形，以及图形间如何进行并、交、差运算）、轮廓识别等。

4）如何解决工程实际应用中的图形处理问题。这里主要研究符合国家标准和生产工程实际需要的零件图、装配图、建筑施工图、电子电路图等图形的绘制及尺寸、汉字、技术要求的标准与处理。

5）研究如何用软件工程的方法设计好的绘图软件和管理系统。好的绘图软件应有良好的用户接口与界面以及可靠的图形文件档案管理系统。

计算机绘图在电机的设计、电机特性的计算机仿真、实验数值处理与电磁场计算的前后置处理等方面都得到了应用。通过这些应用使得电机的计算机辅助设计、制造和测试系统更紧密地联系地一起，从而提高电机设计的效率和质量，设计出结构更合理、性能更好的产品，甚至还可以省去样机的制造，大大缩短设计制造周期，获得更大的经济效益。

5.1.1 计算机绘图的硬件与软件

计算机绘图系统由硬件和软件两大部分组成。所谓硬件是指计算机及图形输入、输出等外围设备，而软件是指专门用于图形显示、绘图及图数转换等处理的程序。

（1）计算机绘图硬件

计算机绘图的硬件主要由计算机（主机）、图形显示器、输入及输出设备组成。

计算机是自动绘图系统的核心部分，它除了接受外部设备输入的程序、数据、命令等进行处理、执行运算、输出中间结果和最后结果，并控制和协调各外部设备的正常工作外，还起着图形处理器的作用。它通过输入设备接受绘图程序或图形坐标信息，经过图形数据处理后，从输出设备输出字符或图形。常用的非图形输入、输出设备有键盘、鼠标、操纵杆、字符显示器、打印机等。图形输入设备有键盘、数字化仪、扫描仪等。图形输出设备有图形显示器、绘图仪等。

（2）计算机绘图软件

1）绘图软件的分级。绘图软件是实现计算机绘图的重要手段，由于计算机绘图领域的多样性，因此绘图软件的品种多。软件品种多，但有许多共同的内容，如画直线、圆弧、字符、比例、尺寸等作为其基本内容。正因如此，绘图软件往往分为三级。一级软件通常称为基本软件，它指绘图时所必需的信息加工、控制及变换处理的软件的功能，如启动绘图仪、定坐标原点、抬笔落笔、选笔、画直线等；二级软件通常称为功能软件，用来扩充一级软件的功能，如画圆、画曲线等；一级及二级软件均属通用性软件。三级软件则一般属专用性的应用软件，用户根据需要自行设计，针对性强，适用面较窄，如画电气线路图、电机冲片图、装配图等。

2）绘图软件的编程语言。绘图软件的编程语言，可以是机器语言、汇编语言或高级语言。而不少绘图软件系统则往往是采用高级语言和汇编语言或机器语言相混合的方式进行编程的。高级语言和汇编语言混合编程的一般情况是：一级软件用汇编语言，二级、三级软件用高级语言。

3）正在应用的一些绘图软件。目前在我国使用的通用软件主要有 AutoCAD（美国 Autodesk 公司）、I-DEAS（美国 SDRC 公司）、UG Ⅱ（美国麦道公司）、EUCLID-IS（法

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

国 MATRA 公司）、Auto-Trol S7000（美国 Autotrol 公司）以及 MEDUSA 、Intergraph 、Calma 、Applicon DPS、ZD-MCAD 等绘图软件。

5.1.2　计算机图形软件标准

为了提高计算机图形软件、计算机图形的应用软件以及相关软件的编程人员在不同的计算机和图形设备之间的可移植性，国际标准化组织（ISO）已经批准和正在讨论的与计算机有关的标准有：计算机图形核心系统（GKS）及其语言联编、三维图形核心系统（GKS-3D）及其语言联编、程序员层次交互式图形系统（PHIGS）及其语言联编、计算机图形元文件（CGM）、计算机图形接口（CGI）、基本图形转换规范（IGES）、产品数据转换规范（STEP）等。

5.2　电机图形的特点与编程技巧

5.2.1　电机图形的特点

电机图形主要有两类：一类为零件图；另一类为装配图。

零件图是制造和检验该零件必不可少的技术资料，它包含的内容有：①一组图形；②尺寸；③工艺技术要求；④标题栏。

装配图是表示整台机器（或部件）的图形，是设计、制造、装配、检验和使用该机器（或部件）的必要的技术资料。它必须具备下列内容：①一组图形；②几何尺寸；③技术要求；④零件序号、明细表；⑤标题栏。

不管是零件图还是装配图，它们的主要内容首先是描述形状结构特征的一组视图。

一台电机一般可分为三大部分：定子、转子和机座。定子部分包括线圈、铁心和紧固件；转子部分包括转轴、转子轭、铁心、线圈、紧固件；机座部分包括机座、端盖、轴承和紧固件。根据各类电机的不同，结构和形状也不同。

电机的基本形状为圆柱形，一些零部件具有轴对称或径向对称的特点，大多数图形由直线与圆弧组合而成的。电机图形的结构形状具有一定的共性，即

1）形状的可分性。零件图形可分解为许多基本图形和零件结构图形。电机零件图也一样。通常把柱体（棱柱体、圆柱体）、锥体（棱锥体、圆锥体）、球体、环体等作为构成各种零件最基本的形体。因此，它们的视图（见图 1.3-26）也是构成各种零件视图最基本的图形，这些图形就称为基本图形。

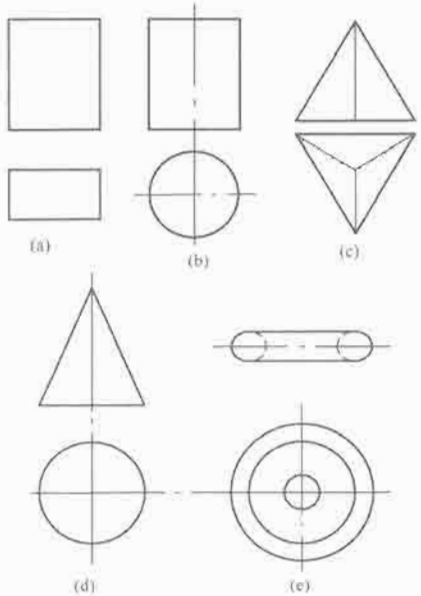


图 1.3-26　基本形体的视图

（a）四棱柱；（b）圆柱；（c）三棱柱；（d）圆锥；（e）环

另外有些图形，如电机冲片中的各种槽形、轴端、键槽等，也是电机零件中常见的图形（见图 1.3-27）。这些图形就称为零件结构图形。这类图形在零件图中是很多的。

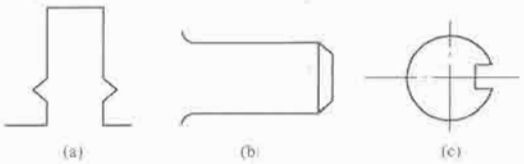


图 1.3-27　零件结构图形

（a）槽形；（b）轴端；（c）键槽

图 1.3-28 是一根转轴，它的视图可看成为如下九个部分组成（见图 1.3-28 图注）。以上这些图形就是基本图形和零件结构图形。一般来说，总可以将零件图形分解为许多基本图形和零件结构图形。

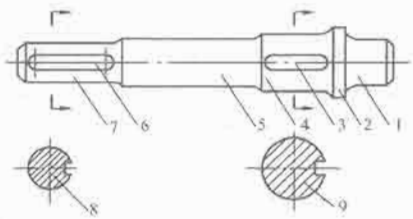


图 1.3-28　转轴

1、7—带倒角的轴端图形，且 7 附有剖切符号；2、4、5—2 为长方形，4、5 为无倒角的轴端图形，且 4 有剖切符号；3、6—长圆形的图形；8、9—键槽图形

2）图形的通用性。零件图或装配图有很多结构图形，如退刀槽、销孔、螺纹孔、轴销孔、中心孔等，会经常遇到。当这些结构用在不同的零部件中时，所不同的往往只是它们的大小和比例，因此这些结构图形具有通用性。在电机的零部件中，如有的绕组、冲片等，即使在不同类型的电机中，其结构也基本固定，因此，它们的图形更具有通用性。

3）零部件的标准化、系列化。电机装配图中的一些标准件、常用件，如螺栓、螺母、垫圈、轴承、键、销、弹簧等，以及电机的端盖、机座等都可以实现标准化、系列化。

由于电机图形具有上述一些特点，因此，就可以将电机图形分级组合而成，即直线、圆弧、点→基本图形→零件结构图形→零件图形→装配图形。根据具体情况，还可以越级组合。编制图形程序时，按照零、部件结构的复杂程度进行划分。以点、线和圆弧作为基本图形元素，构成子图形，再由这些子图形扩展而组合成零、部件图形。这样，计算机只要处理复杂的程度较低的子图形，通过实时处理，从简单到复杂，然后逐步绘出零件或整个部件以至整台电机的图形来。整个图形设计层次可作为以子图形为叶的树状结构，如图 1.3-29 所示。这种图形设计方法被称为子图形组合。



图 1.3-29　子图形组合法结构

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

5.2.2 电机图形软件设计的基本原则

图形软件设计是电机CAD自动绘图和显示的最主要的内容。为了使所设计的软件经济可靠、使用方便等，在设计过程中一般按如下几点原则考虑：

1）简单性。不要用难于理解和复杂的特殊方法。比如参数、功能的选择，应该使用户觉得方便，且通常在实现系统前，先试编使用说明书。

2）一致性。一致的图形系统是一种以一般可预知的方式工作的系统。一致性要求子程序名、坐标系统、圆弧和直线的方向以及错误处理都不例外地遵循简单和一致的模式。因为图形系统中一些过程和约定的统一化、标准化会给设计和使用带来很大方便，避免由于不一致而引起的不必要的错误。

3）完整性。完整性并不意味着全面性，就是说并不是要求系统提供所有各种能想象到的图形功能，但要求设计人员要尽力设计出一组相当小的，却能方便地应付规定范围内所有功能的程序组，使用户能实现所要求的目标。

4）容错性。用户有时会错误地使用图形系统，这时系统应以最小障碍接受这种错误使用，使程序能继续运行下去。例如，有些较复杂的图形，几何参数之间往往是有约束的。如果在程序中对这些约束不加以规定，使用时就有可能因为输入参数的错误，使程序无法继续进行，而觉得不方便。对于严重的错误，系统应给出最有利的提示。

5）性能。图形系统的性能往往受到硬件的限制，如操作系统的响应和显示特性等，对此，设计人员是无能为力的。但设计人员应该尽力采用好的算法来提高性能。一个理想的图形系统应该做到与人无关，与机器无关。

6）经济性。软件的内存容量是衡量图形软件经济性能的重要指标。编写一个庞大而过于浪费的程序是于事无益的。图形系统应该是小型、经济的。

7）柔软性。在一定范围内，应用环境发生变化后，图形系统的功能应能相应地扩充或压缩。

要完全遵守以上这些原则并不容易，且以上这些原则往往相互矛盾，不是同时都能满足的，因此要综合考虑。

此外，为了保证同规格电机能够互换安装，零、部件能够互换使用，还需对以下尺寸作严格控制：

①自轴中心至底脚平面的高度，即中心高 H。

②轴伸直径 D 和长度 E，键槽宽度 F 和轴槽深 G。

③底脚孔的横向中心距离 A 及其对中心线的距离 $A/2$。

④底脚孔的轴向中心距离 B 以及轴伸肩至第一底脚孔的距离 C。

⑤底脚孔直径 K。

⑥定子内径与转子（或电枢）外径。

⑦端盖与机座止口的配合尺寸。

⑧轴承与轴承档和轴承室的配合尺寸。

⑨外风扇和外集电环与轴伸的配合尺寸。

5.2.3 电机图形程序编制的一般要点与步骤

电机图形程序编制的一般要点与步骤归纳如下：

1）分析给定图形，按照要求确定基本几何结构元素图。在编制图形时，不仅要考虑零件图对图形的要求，而且还要考虑装配图对图形的要求。

2）确定该几何结构元素应具有的参数，如定位参数、定形参数、控制参数以及其他有关参数。

3）确定绘图用的数学表达式。

4）画出程序框图。

5）编制程序。

编程中还应注意：编程应认真细致，参数选择尽量能和工程设计中使用的习惯相符，这样使用起来较熟悉和方便。

要充分利用计算机重复运算的特点，比如采用循环、图形对称编程以及多级调用子程序等。尽量考虑少占内存，一图多用，使程序既简洁又具有较广的适应性。

充分利用程序库，借用或修改后借用有关图形程序为用户所需要的图形程序服务，省去编程时间。

5.2.4 绘制电机零件图的参数化方法

在一般的CAD系统中，参数化是指设计对象的结构形状比较定型，可以用一组参数来设计对象，参数与设计对象的控制尺寸有明显的对应关系，从而可以使设计的结果受尺寸的驱动。在电机零件和标准件结构中，大量的定位、定形都可以由一定的尺寸参数控制，这是电机零件和标准件设计中可以应用参数化技术的基础。

针对电机产品系列化、标准化和通用化的特点，采用参数化绘图方法，不但极大地提高了出图速度和图样质量，而且易于扩充、修改，具有很强的通用性，这样绘图系统和电机CAD结合，可以圆满地完成整个设计任务。

下面仍以电机转轴为例，介绍南阳防爆电机厂电机转轴参数化CAD系统的设计思想过程及其方法。该厂有小型及低压中型电机（H80～355）转轴图共12种不同结构。他们实现了一个程序包括了十几种不同结构电机转轴的绘制。做到既通用性好又不增加编程难度。

（1）转轴参数化绘图工作的准备

1）标准的改造。将绘图所用标准中文字叙述及多项约束条件进行合理改造，使之规范化，简单（约束条件要少）明了，以适于建立电机工程数据库的需要。

2）图形改造和优选。产品图用手工绘制时，因人而异，有很大的随意性。如视图的选择不一致、图形布局不一致、尺寸标注的位置不一致和尺寸的选取不规范等。此外，表面粗糙度、形位公差、局部放大图和表格图的表格等都存在此类问题。因此，要将这些形状、视图和尺寸标注各异的图形进行改造优选工作，使之规范化，相互间具有规范的数据关系，为建立数据库和编制参数化绘图程序创造条件。

3）参数代号命名。一套电机零部件图纸，其参数数以百计，因此，一开始就要通盘考虑，对各零（部）件取一定的代号，以利于整个电机绘图系统的数据的流动、共享和管理。如轴取为Z，定子铁心取为DT，风扇取为F等。

4）参数预处理。参数预处理即把数据分成以下3类：

①固定数据。即把一些不规律的结构数据固定成定值，或分成几档固定值，如拆卸档宽定为10mm，平衡环档宽定为16mm（H315）或30mm（H355）。

②简单计算数据。即由其他数据通过简单数学关系导出所需数据，如轴伸键槽长等于E尺寸减5mm（101模块）。

③尺寸链计算数据。即通过尺寸链计算得出所需数据，如轴承档肩至轴伸档肩距离，轴承距等尺寸。

5）数据库的建立。应用于结构设计和工程绘图的数据库，不必包罗万象，实际上，只需建立与结构设计有关的数据库。包括建立通用数据库，如电磁计算库、公差与配合库、结构要素和安装尺寸库等，以及建立专用数据库，如轴、机座和线圈等不与其他零部件共享的专用数据库。这样的建库原则，使得数据库内容大大减少，简化了管理程序。因此，各零（部）件的建库工作可以分阶段完成，特别适于中小型企业进行参数化CAD软件的开发。

（2）转轴参数化程序特点

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

1）软件的多功能特性。电机转轴参数化 CAD 系统，可以实现设计新图、绘制新图和复制旧图 3 种功能。设计新图是由数据库给出关键尺寸值，其他尺寸则由简单计算和尺寸链计算得到，融设计、标准化和绘图于一体，实现高参数化智能式绘新图。绘制新图是由设计者给出绘新图基本数据，它们以文本文件形式存在并传输，其他尺寸则经简单计算和尺寸链计算得到，即人工输入全新数据绘制出全新图形，适于熟练设计员进行产品的开发。复制旧图是针对旧有图样数据，稍加改造，使之更符合设计及工艺要求，它覆盖十几种形式的转轴，包括近百种旧图改造、改版及与原图相比变化不大的特殊订货等设计需要。

2）软件的高参数化。参数化绘图不仅包括主要参数，如轴承尺寸、安装尺寸和电磁计算数据等由程序自动取自数据库，而且形位公差、公差与配合、表面粗糙度、中心孔、挡板和局部放大视图等也由数据库检索生成，于程序中自动定值，直到绘图完毕，无需外加操作。

3）转轴的模块化处理。该厂经过对小型及低压中型所有电机转轴图形资料的搜集与分析，将电机转轴按几何形状和功能特点合理分成 5 段，即轴伸段、左轴承装置段、铁心段、右轴承装置段和风扇段，每一区段有几种不同形状，相应地编制几个结构模块子程序，因此所编模块自然地包容了所有形状的轴段。分成 5 段后的各模块，语句简练，少则几十句，易编制、调试、修改和补充，通过修改和增加模块，并可方便地实现功能扩充的完善。这样，用简单的软件资源可以完成多种结构的图形造型。

5.2.5　绘制电机零件图的交互式参数化方法

参数化绘图虽然具有许多优点，但是，仍然存在一些不足。例如：①采用参数化绘图方法，对绘制某一特殊的派生系列电机时，其软件的开发工作量很大；②参数化绘图模块的扩充有一定的专业技术要求，对用户来说难度较大；③不能在直观的图形界面中实现变参数。于是又出现了将交互式与参数化两种绘图方法的优点结合在一起的交互式参数化绘图方法，它是根据电机零件的特征设计相应的电机零件类（也即电机零部件的几何模型），通过交互式输入界面得到几何模型的一些属性，然后根据已有的电机零部件的一些几何特征，通过电机零件类的绘图函数，绘制出相应的图形。

近期提出了一种参数化绘图软件的自动设计方法，该方法借助于一种面向对象的 MTNGS^{++} 图形系统支撑环境，采用交互方式实现对电机零部件结构的描述；其次利用专用的知识处理系统自动将用户对零部件结构的描述转换为参数化绘图程序，从而使参数化绘图软件由计算机自动设计生成。另外，参数的变化亦可以在 MTNGS^{++} 中通过“尺寸驱动（Dimension Driven）”实现，更为直观方便。

（1）基本思路与方法的实现

交互式参数化方法绘图源程序的生成分以下 3 个步骤实现：①在 MTNG^{++} 支撑交互设计环境对电机零部件作概念设计或在该环境下利用界面的功能用草图描述零部件的几何模型，几何模型存入 MTNGS^{++} 的动态内部数据库（IGDB）；②对零部件几何模型作特征定义（Feature Definition）。亦即提取几何模型的特征参数，并将用户的特征定义自动转换为知识处理系统中基于框架（Frame）知识表达；③知识处理系统依据 IGDB 中的几何模型描述以及用户的特征定义、采用特殊的推理机制得到基于高级程序设计语言的该模型的求解程序。交互式参数化方法实现的过程如图 1.3-30 所示。

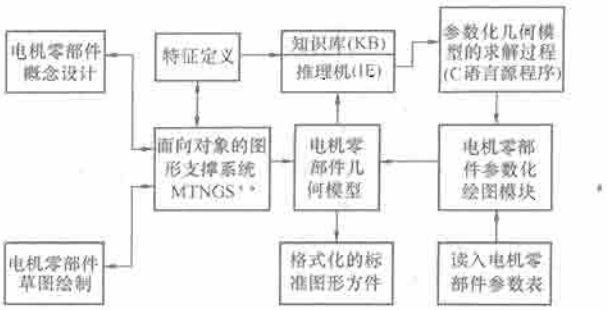


图 1.3-30　参数化绘图软件的自动生成方法

（2）结论

1）电机零部件参数几何模型的建立是电机参数化设计过程中的重要环节。它不但是实现电机零部件参数化绘图、电磁场数值分析前处理和 CAM 等的关键，而且也是实现电机概念设计与详细设计有机结合的关键。

2）面向对象的图形支撑系统——MTNGS^{++} 的研制，给设计者提供了更易发挥创造力的更加方便灵活的设计环境。使电机零部件几何模型的描述变得简便易行。

3）基于知识处理系统电机零部件参数化几何模型的自动建立方法，不但解决了电机零部件参数化绘图软件的自动生成，而且具有速度快、通用性强和能实时纠错等特点，还具有极高的工程应用价值。

5.3　图库及其他

（1）图库的建立

所谓图库的建立，就是说将所有在编制零件图、装配图时要用到的子程序，如轴端、轴承、标注尺寸、剖面线等子程序以及已编成的一些零件图、装配图，如各种冲片图、定子部件图、总装图等，把它们都存入计算机存储系统内，需要时随时调用。

这样一来，就可以在屏幕上用这些已存在的图形来拼装成一个复杂的图形，也可以从一幅复杂的图中删去某个子图形而不影响该图的其余部分。此外，也可取出单个图形进行放大、缩小、旋转、定位、拷贝、修改等处理，从而减少了许多编程时间，提高了绘图效率。在电机行业，建立图库更具有现实意义，因为同类型电机，它的基本结构相类似，当要改进或产生派生系列产品时，只要将基本系列产品中的某些零件图或装配图稍作修改即可混用，所以对电机绘图系统来说，图库的建立更是必须的。

电机图库一般可分为两个部分：一是基础部分，如轴端、标注尺寸等基础子程序库；另一部分是专业库部分，按电机分类建立，如异步电机类、同步电机类、变压器类，在各类下再细分成几个小部分，如异步机再分成为单、三相等。每一小部分的内容包括该电机的所有零部件和装配图程序。这样，对一个电机新产品来说，只要在原有产品图纸的基础上进行修改而不需要重新编程，从而节约了时间并可利用原产品的一些可用之处或完全借用之。

图库建立后，由于存储于图库中的子程序名各不相同，参数也不一样，对于图库中的这么多内容，人们不可能也不希望一一记住它们，因此为了使用户使用更为方便，需要建立和编制各种程序档案卡片或图册，以便使用者随时查阅。

（2）数据结构与数据库

通过对电机图纸设计时所需的数据分析可知，在电机 CAD 系统中，电机图样设计所涉及的工程数据可以分为下面几种类型：

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

1）工程制图标准数据。应包含在绘制电机总装图、零部件图时所必须用到的制图标准，以保证绘出符合标准的图样。

2）电机产品结构数据。包含不同电机的产品结构关系、零部件所属关系等，以方便对电机图样进行管理。

3）系列电机图样和标准零部件数据。将标准的零部件和系列电机图样汇总成库，供以后类似电机设计时使用。

4）图块数据。一些可能无关具体电机本身的数据，但在图样中反复出现，汇总成库，避免重复劳动。

为了将图形存贮于计算机内，借计算机进行图形处理，则图形必须用一定的数据结构来描述，而数据结构与程序是密切配合的，程序执行时，按一定的结构取出数据，再根据不同的要求，使计算机输出需要的图形。电机图形软件数据输入一般为两种型式：一是电磁设计程序直接为绘图程序提供需要的数据，如定、转子铁心和绕组连接图等；二是采用列表输入有关数据，建立相应数据文件，供绘图时调用，如轴、端盖、机座、总装图以及工程制图标准数据、标准零部件数据、图块数据等。如何使其输入数据结构更为合理，输入更为方便，且使零部件的设计更为标准化和系列化，这就要求建立相应的数据库系统，具体见本章 4.4 节。

（3）三维图形与动态试验

建立电机的三维图形，是目前国内外正在研究开发的课题。三维图形的建立将使设计者能对实物图形进行修改，从而使设计的电机结构更趋合理。设计者还可以在屏幕上使实物图形模拟实际电机进行运行试验，以便在产品未投入试制前，就能对某些涉及制造过程的不足之处预先予以修正，从而加快了试制周期保证了产品质量。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第4章 电机结构

电机的结构与电机的用途、转速、防护类型、通风冷却方式以及安装型式等因素有关。尽管不同类型电机结构不同，但通常都是由三大部分组成，即固定部分、转动部分和辅助部分。

1 固定部分

电机的固定部分主要由定子机座、机架、定子铁心、定子绕组、端盖及底板等导磁、导电和支撑固定等结构部件组合而成。

1.1 定子机座

1.1.1 机座的作用及基本要求

定子机座主要用来固定铁心，承受和传递扭矩，支持端盖和气体冷却器等部件。它还能形成电机冷却风路的一部分或作为电机的散热面。直流电机的机座还是磁路的组成部分。

机座的基本要求如下：

1）机座应具有足够的刚度和强度，使其在加工、运输、起吊、分瓣放置和运行中能承受各种机械作用力、电磁力而不致产生有害的变形。通常具有足够刚度的机座，也能满足强度要求。

2）机座应便于加工、运输、安装和检修。

3）机座内圆空间应得到充分利用，并应满足通风冷却的要求，直流电机机座还应满足磁路要求。

4）机座的中心高和底脚安装尺寸应符合有关标准和技术条件的规定。

5）大型两极汽轮发电机铁心振动的双倍振幅如达到或超过30～40 μm，应采用隔振措施。氢冷汽轮发电机的机座应满足密封和氢爆安全的要求。

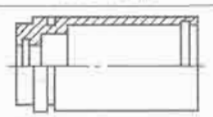
6）大型水轮发电机的机座应能适应铁心热膨胀的要求，刚度应满足运输、吊装的要求。

7）微特电机的机座除应具有足够的强度外，还应能承受潮湿、盐雾、霉菌、温度骤变、强冲击等严酷环境条件的影响。其材料的膨胀系数应与定子铁心的接近。

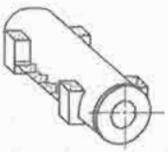
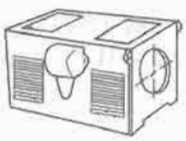
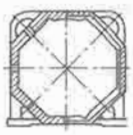
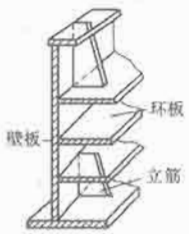
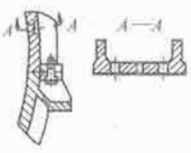
1.1.2 定子机座的结构型式

定子机座安装结构型式可分为卧式和立式两种，从国家标准GB/T 997《旋转电机 电机结构及安装型式（IM代号）》中可看出电机各种安装结构型式。各类电机常用的结构型式见表1.4-1。

表1.4-1 各类电机常用的机座结构型式

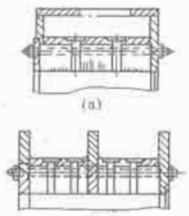
类型	结构简图	特点	应用
圆形整体机座		用不锈钢或铝合金制造（车削或拉伸）	微型控制电机
		一般用铸铁、铝合金或钢板制成，有些体积小、外形尺寸要求高的用型材直接加工	微型驱动电机

续表

类型	结构简图	特点	应用
圆形整体机座		用铸铁制成，壳体上有散热筋作为电机的散热	用于小型自扇冷封闭式异步电动机
		用铸钢或钢板焊接制成	一般用途的中小型直流电机和大型同步发电机励磁用的交流发电机
		用钢板焊接制成	用于大型同步和异步电机
		用钢板焊接制成	用于大型汽轮发电机
箱形机座		用钢板焊接制成，改变罩板和部分零件就可形成不同防护型式的机座	用于大中型同步、异步电机
多边形整体机座		一般用铸钢制成。外形小，内部空间可充分利用	常用于冶金起重、船舶、牵引设备的直流电动机
分瓣机座		用钢板焊接，可分为2、3、4、6、8瓣	用于大型水轮发电机和大型同步电机
		有铸钢和焊接两种，分瓣位置在水平中心面或中心面以下，截面为槽形，以增加机座刚度。便于检修	用于大型直流电机

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

类型	结构简图	特点	应用
叠片式机座		磁轭、主极、换向极在同一整圆冲片上。外形小，内部空间可充分利用	用于负载变化大和动态性能要求较高的中小型直流电机
		磁轭为叠片，铁心叠压后将底脚板、端压板焊成一整体	用于负载变化大和动态性能要求较高的中小型直流电机
	 (a) (b)	磁轭用1～1.6mm冲片拼合成整圆，在水平面附近分开。图(a)机座的机架是一独立体，叠片工艺简单；图(b)机架叠片后焊接成形。刚度好，外形小，工艺要求高	用于冲击负载和动态性能要求较高的大型直流电机

1.2 定子铁心

定子铁心是构成电机磁通回路和固定定子线圈的重要部件，它由冲片及各种紧固件压紧固成一个整体。

1.2.1 定子铁心的基本要求

1）导磁性能好，损耗低。通常大型电机的铁心应做铁损耗试验，由试验测得比损耗值应不大于所用硅钢片在频率为50Hz、磁通密度为1T时，每公斤硅钢片标准损耗的1.3倍。铁心的温度稳定后，其最高温升应低于25K，不同部位的温差值应低于15K。如果温升偏大，则可能存在局部短路。

2）刚度好，振动小。对装压紧固的铁心，应使冲片之间保持一定压力，通常大型电机为1.5～2.0MPa，小型电机为0.7～1.0MPa。

3）在结构布置上有良好的通风冷却效果。在采用径向通风的大中型电机中，为了使冷却气体能吹拂铁心的中间部分，使铁心获得良好的冷却效果，铁心沿轴向分成很多叠片段。每段长30～60mm，段间装有6～10mm宽的通风槽片形成径向通风沟。

4）叠压后铁心内径和槽形尺寸应满足设计精度要求。尤其是微特电机，除要求铁心紧固，防止冲片片间短路外，还应保证槽分度精度达到角分级水平，否则将严重影响电机的精度指标。

此外，对大型汽轮发电机和大型水轮发电机的铁心还有一些特殊要求。例如，大型汽轮发电机铁心两端通常设有若干阶梯式叠片段，有的还在阶梯段冲片的齿中间开有狭长槽，以降低由端部漏磁的轴向分量产生的附加损耗。大型水轮发电机要保证分瓣铁心的合缝间隙，否则将导致电机运行时铁心振动。

1.2.2 定子铁心冲片

定子铁心冲片是由厚度是0.5或0.35mm的热轧、冷轧硅钢片或铁镍软磁合金薄板冲制成的。通常，冲片外径在1m以下的中小型电机采用整圆形冲片[图1.4-1(a)]，外径大于0.99m时采用扇形冲片[见图1.4-1(b)]。但近年来，为了提高硅钢片的利用率，小型同步电机如柴油发电机也有采用扇形冲片的。

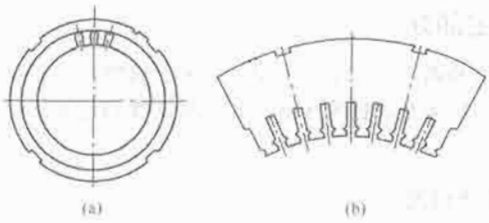

(a) (b)

图1.4-1 定子铁心冲片
(a) 整圆冲片；(b) 扇形冲片

为了减少铁心中的涡流损耗，大中型电机的冲片表面需经绝缘处理（参见第1篇第5章）。

为了有效地紧固铁心，防止轴电流，扇形冲片的每片槽数、接缝位置、拼片数等在设计时均应合理选择。

1.2.3 通风槽片

通风槽片由槽片和槽钢组成。槽片一般是用0.65～1.00mm厚的酸洗钢板冲制的。它与定子冲片形状相同，只是沿槽周围外扩1～2mm。槽钢一般用Q235A条钢拉制成形，也可用非磁性钢制成，其高度h通常有6mm、8mm、10mm三种。在槽片的每个齿上点焊一根或两根槽钢，如图1.4-2所示。

1.2.4 定子铁心的紧固

定子铁心可采用外压装或内压装方式装压紧固。外压装的特点是将冲片压装并紧固成单独的铁心，经嵌线和浸漆烘干后压入机座。铁心和机座之间保持一定过盈量，使铁心定位，对封闭式电机还有利于散热。这种压装方式操作方便，可减轻劳动强度，提高生产效率。

内压装的特点是将冲片直接压装在机座中，并用紧固件固定。

通常，采用整圆冲片的用外压装，采用扇形冲片的用内压装。

（1）外压装铁心的紧固

小型和微型电机采用外压装铁心时常用扣片紧固，直径较小的铁心也可用氩弧焊接紧固；中型电机外压装铁心常加焊辐筋紧固。带鸽尾型扣片槽的铁心结构如图1.4-3所示。

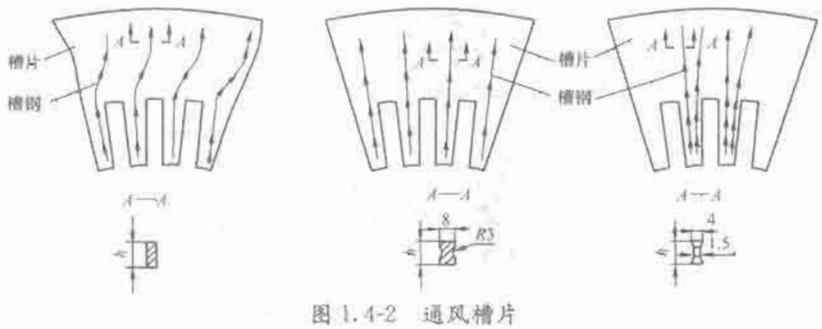


图1.4-2 通风槽片

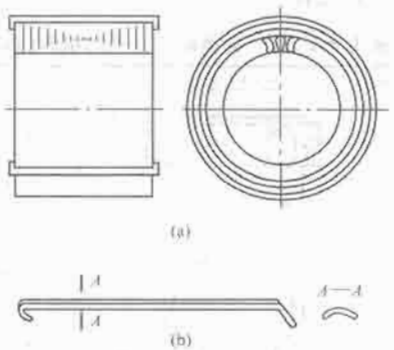


图1.4-3 带鸽尾型扣片槽的铁心结构

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

其特点是扣片槽不仅有轴向紧固作用，而且它胀紧在鸽尾槽内，使冲片不会发生周向错动。通常扣片数为4～8根，每根宽度为12mm，厚度为1.5mm。

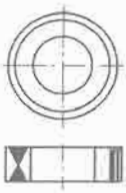
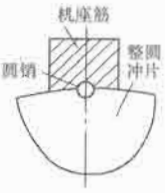
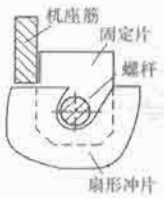
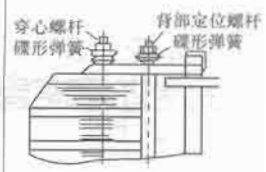
用焊接紧固的铁心，焊缝可在铁心外圆上已冲好的若干个槽内。氩弧焊接的铁心变形小，焊缝表面较平整。加焊辐筋紧固的铁心，辐筋应按对称交叉方式焊接，以减少铁心变形。

(2) 内压装铁心的紧固

大型和中小型电机内压装铁心沿轴向和圆周方向的紧固方式见表1.4-2。

除上述一些紧固方式外，小功率电机还可采用铝压铸固定和自锁式冲片固定结构。

表1.4-2 内压装铁心的紧固方式

冲片类型	整圆冲片		扇形冲片		
轴向定位方式	定子冲片采用胶合或浸漆胶合固定	用压圈和弧形键紧固	用拉紧螺杆紧固	用拉紧螺杆或鸽尾筋兼作拉紧螺杆紧固	用定位螺杆、穿心螺杆加碟形弹簧紧固
示意图					
应用	机座号较小的微特电机	小型和微型电机	中型电机	大中型电机	大型汽轮和水轮发电机

1.3 直流电机的主极和换向极铁心

参见第4篇第7章。

1.4 定子绕组

1.4.1 结构要点

定子绕组由若干相互绝缘的圆形或矩形导线或股线组成。由于电机的容量、电压以及冷却方式不同，绕组的结构型式各异。对于空气表面冷却的大型电机绕组，股线是实心的；对于直接氢冷、空冷或水冷的绕组，股线是空心的或部分股线是空心的。绕组股间、匝间，对地都应绝缘。不同电压等级电机的定子绕组的绝缘结构，参见本篇第5章。

定子绕组在槽部用槽楔径向固定，在端部用绑扎或端箍、压板固定或用几种方式组合进行固定。

1.4.2 绕组的结构型式及其应用

绕组的结构按嵌放式可分为以下三种：

(1) 散嵌绕组

用于低电压的、定子槽形为半闭口槽的小型电机。它由漆包圆线或玻璃丝包圆线绕成线圈，嵌线后连接成绕组。匝间绝缘是导线表面的漆膜或玻璃丝，对地绝缘为槽绝缘，如图1.4-4所示。

此外，在有些微型驱动电机和控制电机中，还采用集中绕组、无槽绕组，甚至有的电机将绕组导线直接绕在铁心上。

(2) 分片嵌绕组

它用于额定电压为380V、定子槽形为半开口槽的中型和小型电机。绕组由漆包或玻璃丝包扁线绕成框式线圈，由于槽的开口宽度只有线圈边的一半，所以绕组的线圈边有两片拼合而成，嵌线是分片入槽，并在槽内并合。导线外表面的漆膜或玻璃丝作为匝间绝缘，槽绝缘为对地绝缘，如图1.4-5所示。

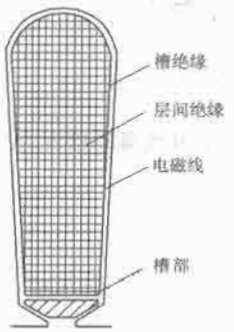


图1.4-4 散嵌双层绕组图



图1.4-5 分片嵌双层绕组

(3) 整嵌绕组

用于额定电压为3000V及以上的大中型电机，槽型多为开口槽。多数有多股玻璃丝包或漆包加玻璃丝包扁线制成。匝间绝缘和对地绝缘直接包绕在导体上。

整嵌绕组又分为叠绕组和波绕组两种，如图1.4-6所

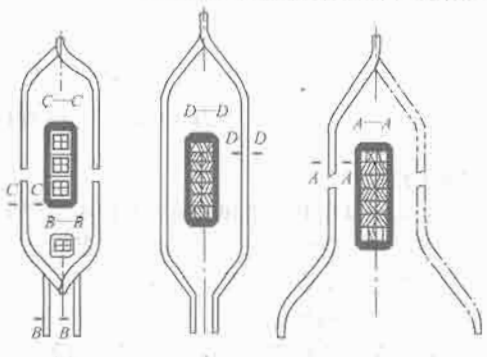


图1.4-6 整嵌绕组

(a) 框式叠绕组；(b) 篮式叠绕组；(c) 条式波绕组

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

示。叠绕组又分为多匝框式叠绕组和单匝篮式叠绕组等。

篮式叠绕组和波绕组都是由两根条形线棒组成的，嵌线后端部用并头套连接。它用于大型汽轮发电机和水轮发电机。框式叠绕组广泛用于大中型交流电机。

1.4.3 绕组的换位

随着大型交流电机电负荷的增加，多股并绕的绕组导体中的股线间循环电流损耗大大增加。为了降低循环电流的损耗，须对股线进行编织换位。

汽轮发电机广泛采用线棒在槽部进行 360°换位，如图 1.4-7 所示。大容量汽轮发电机则采用槽部 540°换位，如图 1.4-8 所示。这两种换位对于槽部漏磁通感生引起循环电流的股线间电动势差可全部抵消，而 540°换位还可部分抵消由端部漏磁通感生引起循环电流的电动势差。

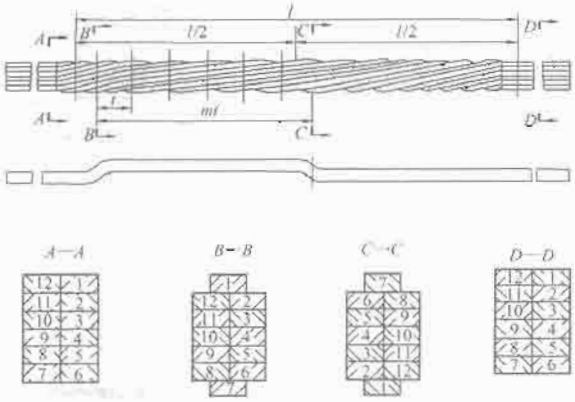


图 1.4-7 定子线棒 360°换位示例（$m=6$）

槽部股线换位节距 t 由铁心长度 l 和线圈沿槽深方向的股线数 m 决定，槽部 360°换位时，有

$$t=\frac{l}{2m}$$

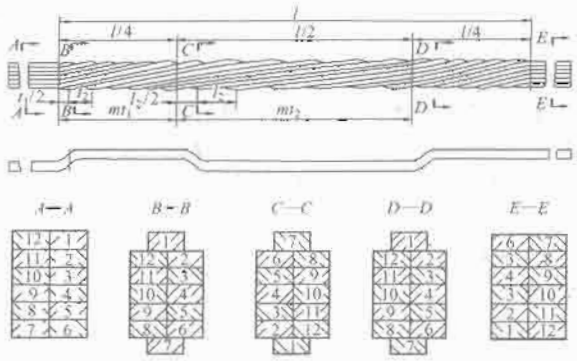


图 1.4-8 定子线棒 540°换位示例（$m=6$）

槽部 540°换位时，在两端 1/4 铁心长度内的换位节距为 t_1 为

$$t_1=\frac{l}{4m}$$

在中部 1/2 铁心长度内的换位节距 t_2 为

$$t_2=\frac{l}{4m}$$

考虑到弯制工艺要求，对于由实心股线组成的线棒，换位节距宜不小于股线宽度的 5 倍，否则不宜弯制；对水冷线棒则应不小于 7 倍左右，以防止弯制时空心股线发生凹瘪。

在水轮发电机中，对匝数较少的框式叠绕组，当绕组支路电流大于 400～500A 时，常采用端部换位或引出线换位两种方式如图 1.4-9 所示。端部换位可以在绕组接线端或非接线端进行，换位时将绕组部分或全部线匝扭转 180°。波绕组股线一般采用槽部直线部分 360°换位。对铁心长度较短的电机，有时采用不完全换位或空换位来消除端部漏磁感应电动势在股线间形成的环流，如图 1.4-9(c)～图 1.4-9(e)所示。换位节距不宜太小，通常当股线宽度与厚度比 $b/d=2.4\sim3.0$ 时，$t=30\sim50$mm。

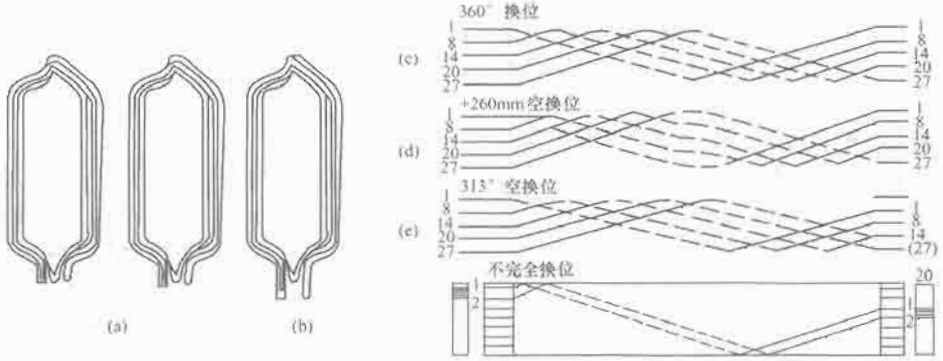


图 1.4-9 水轮发电机绕组股线换位示意图

(a) 端部换位；(b) 引出线换位；(c) 360°换位；(d) 空换位；(e) 不完全换位

1.4.4 绕组的固定

为防止电机绕组在电、热和机械力的作用下产生振动和有害变形，绕组应可靠地固定。高压电机和低压电机绕组的固定结构，分别参见本篇第 5 章。

大型汽轮发电机和水轮发电机定子绕组端部的固定十分重要，也比较复杂。各种固定方式参见第 2 篇第 3 章 3.1.1 节和第 4 章。

微型驱动电机和控制电机的线圈端部可用浸漆或环氧胶塑封固定。

1.5 主极线圈和换向极线圈

参见第 4 篇第 7 章。

2 转动部分

电机的转动部分包括转轴、转子铁心、转子支架、转子绕组、集电环、换向器和风扇等部件。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.1 转轴

转轴是电机转动部分的关键部件。它要传递转矩，承受转子全部重力和单边磁拉力，还要承受弯矩、轴向推力和扭振时所产生的交变力矩等。因此，转轴必须满足下列基本要求：

1）有足够的强度，能承受运行中可能遇到的各种负载而不致产生残余变形和疲劳破坏。

2）有足够的刚度。通常转轴的最大挠度不超过单边气隙的5%～10%。防止定、转子偏心引起不平衡磁拉力，进一步增大偏心值会产生振动或定、转子相擦。

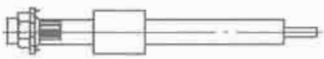
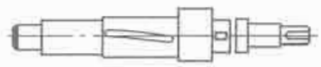
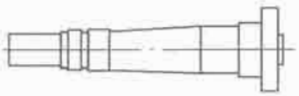
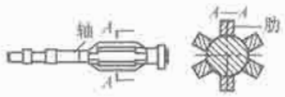
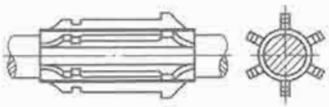
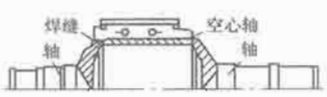
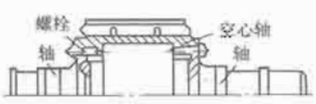
3）转轴的临界转速至少应离开电机额定转速的20%。变速电机应工作在第一临界转速之下，汽轮发电机和高速大容量异步电动机则工作在第一和第二临界转速之间，也有工作在第二和第三临界转速之间的。

4）大型电机和承受周期性脉振转矩的电机（如柴油发电机）的轴系，必须使其扭振固有频率离开交变转矩频率。特别是交流变频调速的电机，因其频率随转速和负载变化，应综合考虑这一问题。

电机常用转轴的结构型式见表1.4-3。电机轴身直径220mm、长度350mm以下圆柱形轴伸和圆锥形轴伸的公称尺寸应符合国家标准GB/T 756《旋转电机 圆柱形轴伸》和GB/T 757《旋转电机 圆锥形轴伸》的规定。

中小型电机轴的材料，常用35钢、40钢、45钢，大型电机的轴常用45钢和合金钢，并且轴的材料一般都应经过热处理，以提高材料的机械强度和韧性。有些微特电机的轴用不导磁的不锈钢制成。转轴常用结构钢的力学性能见表1.4-4。大型汽轮发电机转轴材料，参见第2篇第3章。

表1.4-3 电机常用转轴的结构型式

类型		结构简图	特征	应用
实心轴	光轴		结构简单	用于微特电机
	螺纹、齿轮、花键轴		一般用磁导率小的不锈钢1Cr18Ni9Ti或Cr17Ni2制成。为了与伺服系统的元件及整机连接，轴伸既有螺纹又有齿轮。轴的另一端与集电环内孔黏结	用于微特电机
	不带法兰	 	联轴器是用键或热套安装在轴上，中小型电机的轴本体为圆钢，大型电机的轴为锻钢	大、中、小型直流和交流电机
	带法兰		轴本体、轴伸和法兰锻成一整体	广泛用于座式轴承结构的直流发电机
	焊接组合	 	轴本体是锻件，粗加工后与筋板焊成一整体，可提高轴的刚度，并有利于轴向通风	用于铁心较长，装支架有困难的大中型直流电机和交流电机
空心轴	焊接式	 	装铁心的一端为空心轴，与其他部分的实心轴焊接成一整体，这种结构质量轻、转动惯量小、强度好、刚度高	用于大型轧钢直流电动机
	螺栓联接式	 	装铁心的一端为空心轴，与其他部分的实心轴用法兰螺栓联接	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.4-4 转轴常用结构钢的力学性能

钢 种	热处理方式	截面积尺寸 (mm)	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服点 σ_s (MPa)	冲击韧度 a_k (kJ/cm²)	伸长率 δ(%)		断面收缩率 ψ(%)	
						锻造比 <5	锻造比 ≥5	锻造比 <5	锻造比 ≥5
30	正火	≤100	450	235	29	14	12	38	29
		101～300	440	225	29	14	12	37	28
		301～500	430	215	29	14	12	32	24
		501～750	420	205	25	13	11	28	21
35	正火	≤100	480	254	29	14	12	34	26
		101～300	470	245	25	14	12	32	24
		301～500	450	225	25	13	11	30	22
		501～750	430	215	20	12	10	26	19
		751～1000	410	205	20	11	9	24	17
40	正火	≤100	520	260	25	13	11	32	24
		101～300	500	254	25	13	11	29	22
		301～500	480	245	20	12	10	26	13
		501～750	470	235	20	11	9	24	18
		751～1000	450	225	15	11	9	22	16
45	正火	≤100	560	284	25	11	9	30	23
		101～300	540	274	20	11	9	28	21
		301～500	520	260	20	11	9	26	19
		501～750	500	254	15	10	8	24	18
		751～1000	480	245	15	9	7	22	16
20SiMn	回火		450	225	29		14		22

2.2 转子铁心

2.2.1 异步电机和直流电机转子铁心

异步电机的转子铁心和直流电机的电枢（转子）铁心，通常都用 0.35mm 或 0.5mm 厚的硅钢片冲制而成。冲片外径小于 1m 的一般采用整圆冲片，大于 1m 的采用扇形冲片。通常除小型和微型电机的冲片外，大中型异步电机的转子冲片和直流电机的电枢冲片都需绝缘处理。整圆冲片叠装后两端用压圈压紧并用键固定在轴上或支架上。扇形冲片叠装后通常用螺杆和压圈固定在支架上，如图 1.4-10 所示。为保证冲片与支架同心，在支架每条筋上用成对斜键沿径向和切向楔紧。

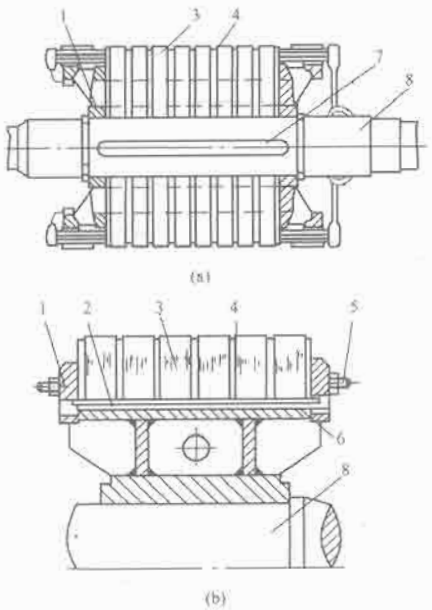


图 1.4-10 异步电机转子冲片固定结构
(a) 用压圈和弧形键固定；(b) 用螺杆和压圈固定
1—压圈；2—支架；3—转子冲片；4—通风沟；5—拉紧螺杆；6—斜键；7—键；8—转轴

铁心与轴（或支架）必须可靠地连接，以传递转矩。连接方式由电机的结构决定，有键连接、滚花冷压轴和热套等。

微特电机的转子铁心或电枢铁心通常是将冲片在叠装工具上叠好后压紧，然后把滚花轴压入，靠过盈固牢。过盈量大小按传递转矩的大小确定。

为了加强铁心冷却，大中型电机和某些小型电机的转子铁心或电枢铁心沿轴向分段，每段铁心长 40～60mm，段间设有径向通风沟，或在冲片轭部冲制轴向通风孔。

2.2.2 凸极同步电机转子铁心

凸极同步电机转子铁心由磁极铁心和磁轭铁心组成，如图 1.4-11 所示。磁极铁心有叠片的和实心的两种结构。前者由 1～1.5mm 厚的 Q235 或 16Mn 钢板冲片叠成后用铆钉或拉紧螺杆等紧固成一整体。铆钉孔或螺杆孔的面积应分别不小于冲片面积的 1/30 或 1/40。每张冲片上的铆钉孔或螺杆孔一般都是 4 个，若冲片面积很大，采用 4 个孔所使用铆钉或螺杆的直径过大而紧固困难时，则可用 6 个孔及以上，以保证铆钉和螺杆的拉应力分别不超过 75MPa 或 100MPa 时，冲片片间压力达到 2.5MPa。

对磁极铁心长度为 2m 以上的大型凸极同步电机（如大型水轮发电机），为保证磁极铁心的整体性，提高其刚度，

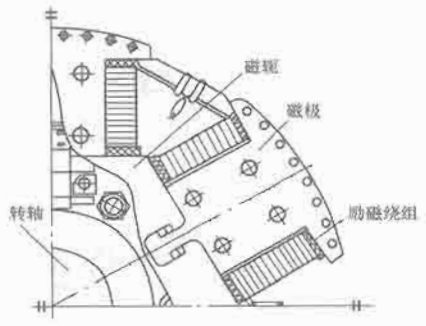


图 1.4-11 凸极同步电机转子

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

除采用拉紧螺杆固定外，还可在极身两侧开鸽尾槽，在槽中用成对楔形鸽尾加强键楔紧。

叠片磁极铁心工艺性好，已被广泛采用。

实心磁极采用锻钢和铸钢制成，只有在下列情况下才使用：

1）负载飞轮力矩 GD^2 很大，叠片磁极的阻尼绕组承受不了电机起动过程中的发热。

2）在高速电机中，当离心力以及因各阻尼条中电流分布不均匀而引起的热应力作用下，阻尼绕组的机械强度不能满足要求。

3）磁轭既是磁路的一部分，也是固定磁极铁心的结构部件。磁轭也分为叠片磁轭和实心磁轭两种结构。

叠片磁轭由厚度为3～6mm的Q235或16Mn钢板冲制而成。中小型电机采用边数与磁极数相等的多边形整体磁轭冲片，大型电机则采用扇形磁轭冲片。

此外，小型同步电机还有采用磁极与磁轭为一体的冲片的。

常用磁极冲片的型式及其与磁轭的固定见表1.4-5，常用磁轭型式及其与轴或支架的固定方式见表1.4-6。

表1.4-5 常用磁极冲片的型式及其与磁轭的固定

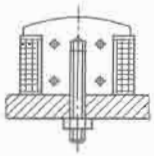
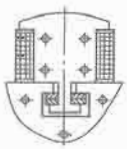
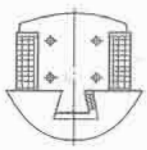
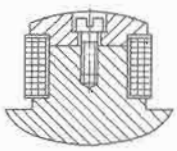
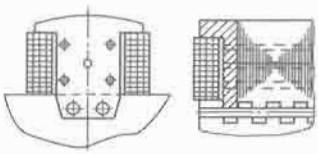
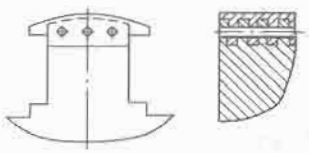
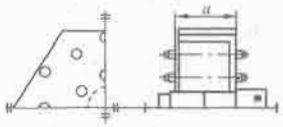
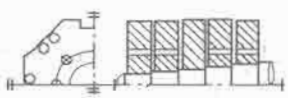
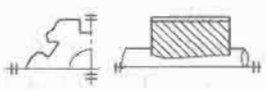
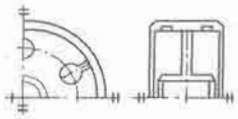
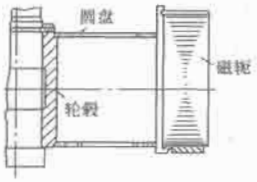
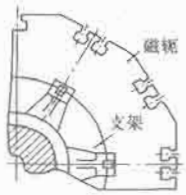
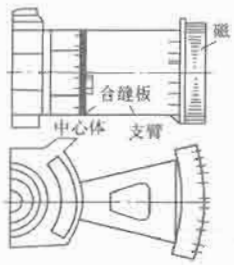
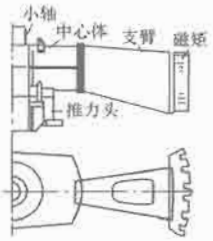
结构型式				
特点	磁极用螺栓固定在铸钢磁轭上，结构较简单	磁极用单个T尾或多个T尾固定在叠片或铸钢磁轭上，结构简单	磁极用鸽尾固定在叠片或铸（锻）钢磁轭上，工艺较复杂	极身和磁轭成一整体，用高强度合金钢或高碳钢螺钉将极靴固定在极身上，结构、工艺较复杂
应用	转子圆周速度低于40m/s的中小容量的同步电机	磁极应力高，不宜采用螺栓、且磁轭应力低的大中容量电机	磁轭应力较高的中小容量电机及部分大容量电机	中小容量高速电机
结构型式				
特点	极身用薄钢板冲制，磁轭用厚钢板或整体锻钢，两者互成梳齿形配合，并用销钉固定。可承受较高的离心力，结构、工艺复杂	极身与磁轭铸（锻）成一体，极靴和极身成梳齿形配合，两者用销钉固定。可承受较高的离心力，结构、工艺复杂	稀土磁钢黏结在硅钢片叠压的铁心外圆上，铁心用键与轴固定，稀土磁钢外缠绕玻璃纤维无纬带并用环氧胶固定	
应用	强度要求较高的高速同步电机	强度要求较高的高速同步电机	中高档数控机床、工业机器人、火炮、雷达等驱动的永磁交流伺服电动机	

表1.4-6 常用磁轭型式及其与轴或支架的固定方式

结构型式		示意图	特点	适用范围
无支架磁轭结	整圆叠片式磁轭		由3mm厚整体冲片叠成，用两块端压板和拉紧螺杆紧固。通常 L 小于900mm，加工套轴方便	转子飞逸圆周速度低于160m/s的水轮发电机和圆周速度低于40m/s的同步电动机
	钢环磁轭		转轴上热套有若干段长为400～500mm的锻钢或铸钢环。钢环磁轭强度比扇形叠片磁轭的高	转子飞逸圆周速度为160～170m/s的水轮发电机
	整段磁轭		磁轭与转轴锻成一体，或者是磁轭与极身锻成一体，加工后套轴或者是磁轭、极身、转轴锻成一体。结构紧凑，机械强度高	4、6、8极的高速同步电机

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

结构型式			示意图	特点	适用范围
无支架磁轭结构	圆筒形磁轭			用铸钢(或铸铁)整体铸造，或者采用铸焊结构	低速大中容量的同步电机
带支架的扇形叠片磁轭	圆盘式支架			由锻造轮毂或组合的中心体与圆盘焊成。结构紧凑、用料省、刚度大、通风好	大中型水轮发电机
	整铸式支架			用ZG270-500铸钢整体铸造，结构紧凑、简单	转子飞逸圆周速度约为140m/s的高速水轮发电机
带支架的扇形叠片磁轭	组合式转子支架	穿轴组合式转子支架		由中心体和支臂组成，通过合缝板连成一体。通常中心体用制造轮毂与钢圆盘焊成，也有用钢板焊接成的，轮毂与轴多采用热套结构	大容量水轮发电机
		分段轴组合式转子支架(或称无轴结构)		由中心体和支臂组成，通过合缝板连成一体，通常中心体采用铸造和焊接结构，下端与主轴或带推力头的主轴通过螺栓连接。不用热套轮毂，转子起吊高程可降低，可减轻锻件质量	大型伞式水轮发电机

2.2.3 隐极同步电机转子铁心

中小型同步电机的隐极转子铁心结构与异步电机的转子结构相似，但一般用Q235钢板冲片叠装而成。

汽轮发电机的隐极转子铁心与轴锻成一体，要求锻件的机械强度高和磁化性能好。轴的本体部分作为磁极，加工出若干槽，在槽中嵌放励磁绕组，无槽的大齿习惯上称为极身。

有些高转速同步电动机的转子也做成隐极式的，其结构与汽轮发电机相似。

2.3 转子绕组

2.3.1 异步电机的转子绕组

(1) 绕线转子绕组

可分为散嵌和插入式两种。前者用于小型及微型异步电机，后者用于大中型异步电机。绕组端部需用合成树脂浸渍的无纬玻璃丝带或钢丝绑扎固定，高速大型电机可采用整体锻造的非磁性护环固定，以承受电机运行时的离心力。

1) 散嵌绕组。用圆漆包线绕制并配用热态黏结力强与漆包线兼容性好的浸渍漆。转子散嵌绕组的结构基本上与定子散嵌绕组的相似，但应注意离心力作用的因素。浸漆干燥时，宜采用立式浸烘，以免引起转子不平衡。

2) 插入式线棒绕组。大多采用裸导体，每槽上下两根。导体一端先弯制成形。小型电机接成叠绕组，大中型电机接成全距波绕组，高速电机也可接成短距叠绕组，以缩短线圈端部长度，减少离心力。

插入式线棒的绝缘结构，参见本篇第5章5.2节。

(2) 笼型转子绕组

由导条和端环组成。小型电机和转子直径为600mm以下的中型电机，导条和端环通常用纯度不低于99.5%的工业纯铝铸成。

大型电机和部分中型电机，则用未绝缘的圆形、长方形或其他形状的紫铜、青铜或黄铜导条，有的也可用相同形状的铝或铝合金导条。导条插入槽内后，两端与端环接成一整体。

对要求起动转矩较高、起动电流较小的电机(如高转差率电机、辊道电机等)，可用电阻率较高的铝合金；对转子直径较大的大中型电机或有特殊要求的电机，可用紫铜导条；对要求起动性能好的电机，可用双笼结构，其上笼用电

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

阻率较高的黄铜或青铜，下笼用紫铜；对要求转子电阻率高的电机（如力矩电机），其导条和端环均可用黄铜制造。双笼及深槽转子因变频调速技术的发展，有被逐渐淘汰的可能。

铸铝转子结构简单、制造方便，大多同时铸出风叶和平衡柱。对有径向通风沟的铸铝转子，在通风沟段常装有通风沟管，以防止铸铝时在通风沟处漏铝。

焊接的笼型绕组除承受热应力、电磁力和离心力外，还承受电机加速或制动时所产生的切向应力在导条伸出槽口部分产生的弯矩。笼型绕组各部分发热不均匀所引起的热应力是导条可能产生裂纹甚至断裂。电磁力的作用将引起导条在槽内振动而引起疲劳损坏。因此，笼型绕组在结构上应考虑以下几点措施：

1）尽量减小导条与铁心槽壁之间的间隙，或在槽口或沿槽的长度分段挤压胀紧。对大型高速电机应在槽的全长内挤紧或用斜楔在导条下部楔紧。

2）双笼转子的上笼端环与铁心端面之间应有适当距离，以减少起动时热变形引起导条的弯曲应力。

3）导条和端环尺寸应能满足电机起动热容量的要求。大中型电机应进行起动温升计算，以控制其温度不超过最高允许值。

4）端环的圆周速度较高时应加护环。

2.3.2 同步电机的转子绕组

同步电机的转子绕组主要包括励磁绕组和阻尼绕组二种，这里分别加以介绍。

（1）励磁绕组

由于同步电机的转子存在凸极式和隐极式两种结构，相应地，其励磁绕组也具有集中绕组和分布绕组两种形式。

1）集中绕组。与直流电机主极绕组相似，凸极同步电机的励磁绕组为集中绕组。大型凸极同步电机通常用裸扁铜牌绕制或拼焊，匝间、绕组与极身间均需绝缘，为加强绕组的冷却，除用不同截面的铜排外，还可使绕组的一部分裸露在冷却气体中。

中小型电机导体截面积小，匝数多，多采用玻璃丝包扁线或圆线绕制，经绝缘处理后装配到磁极上。它可以制成单层或多层。为改善励磁绕组的散热条件以及提高空间利用率，可将励磁绕组直接绕在磁极与磁轭为一整体的冲片磁极铁心上。

某些高速同步电机的励磁绕组也有采用铝扁线绕制的，以减少励磁绕组的离心力及相应的侧向分力。

常用励磁绕组的结构型式和应用见表 1.4-7。励磁绕组侧向固定型式见表 1.4-8。

2）分布绕组。隐极同步电机，如两极汽轮发电机、小型柴油发电机、同步异步电动机。正弦波发电机以及用交-交电力变频器给励磁绕组馈电的发电机、电动机均采用分布绕组。除小型柴油发电机外，通常采用裸扁铜线扁绕成线圈后嵌入槽内，匝间和对地均需绝缘，参见本篇第 5 章 3.4 节。

同步异步电动机、正弦波发电机和调速的发电机、电动机的励磁绕组则是能产生旋转磁场的三相或两相分布绕组。其结构与绕线转子异步电动机的转子结构相似。

表 1.4-7 常用励磁绕组的结构型式和应用

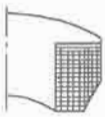
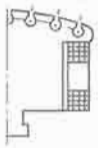
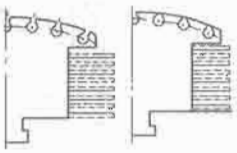
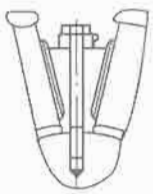
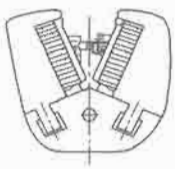
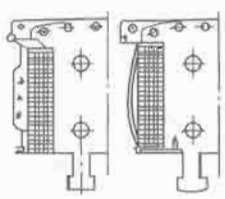
结构型式					
特点	用圆线或扁线绕制，经绝缘处理后装到磁极上	用矩形裸扁铜排绕成，绕组散热表面为矩形	用七边形裸扁铜排绕成，绕组散热表面为矩形的 1.8～2.0 倍	用等宽度或不等宽度的矩形裸扁铜排交错排列绕成，绕组散热表面较大	用矩形裸扁空心铜排绕成，内通冷却水，冷却效果显著提高
应用	小型凸极同步电机	励磁绕组热负荷不高的中型凸极同步电机	大型水轮发电机和同步电动机	励磁绕组热负荷高的大容量水轮发电机	大容量水内冷的水轮发电机

表 1.4-8 励磁绕组侧向固定结构型式

结构型式			
特点	用螺钉穿过撑块固定于磁轭上，结构简单	用螺钉将撑块撑紧，结构简单	利用围带将线圈侧向压紧，这种结构能够在不掉出转子的情况下，调出磁极来检查磁极线圈或定子线圈
应用	中小容量同步电机	极间空间较窄的水轮发电机	磁极铁心较长的大容量水轮发电机

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

(2) 阻尼绕组

同步电机装设阻尼绕组的目的主要有两个方面：一是在系统扰动情况下对转子进行整步，抑制系统的振荡；二是作为电动机运行时可实现直接起动或辅助起动。在设计上还应同时考虑阻尼绕组承受的外部电源谐波和内部时空谐波的影响。

阻尼绕组的阻尼条可用黄铜、紫铜或青铜制成。阻尼环大多数用紫铜带弯成一段段扇形（每极一段）后用连接片连成一体。阻尼条与环用铜焊或银焊连接。实心磁极可用紫铜整圆阻尼环，或用紫铜或黄铜制成的连接片将相邻各极连接起来。有的发电机阻尼环也可以不连接。

为防止阻尼绕组因离心力过大而导致变形，应将它固牢。常用的固定结构如图 1.4-12 所示。在 1.2 倍额定转速下，转子周速 $v_r<60m/s$ 时，可用悬挂式结构；$v_r\geqslant60m/s$ 时，可用止口式或其他刚性固定结构。

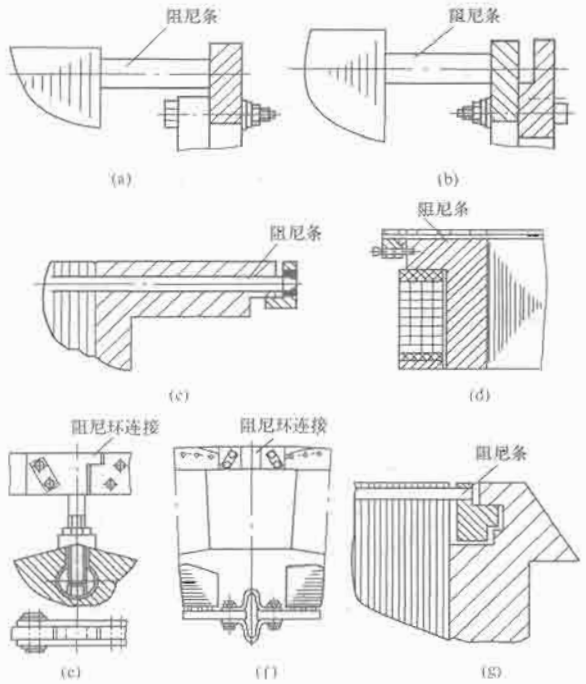


图 1.4-12 阻尼绕组固定结构

在汽轮发电机中，为防止电机在不对称负载运行时负序电流引起的局部过热，有时在转子表面装设不同形式的导电结构。此结构的导电体有时亦称阻尼绕组，具体参见第 2 篇第 3 章。

2.3.3 直流电机的电枢绕组

按照组件与换向片之间不同的连接规律，电枢绕组可分为叠绕组、波绕组和蛙绕组，参见第 4 篇第 7 章。此外，在微型直流伺服电动机中还采用无槽电枢绕组、空心杯电枢绕组以及印制绕组等一些特殊结构型式的电枢绕组，相关内容参见第本篇第 6 章。

2.4 集电环和电刷

绕线转子异步电动机转子上的集电环和固定于定子上的电刷用于接通起动电阻，并在电机起动后将转子绕组短路。同步电机的集电环及电刷用于将励磁电流引入旋转的励磁绕组。

小型电机常用整体塑料集电环，中型电机常用装配式集电环，中低速大型电机常用支架式集电环，其特点是金属环直径大，可安装较多的电刷。

高速大型电机，如汽轮发电机的集电环，通常将金属环热套在绝缘的套筒上；也有直接热套在经绝缘处理的轴上，以满足通过大电流和机械强度的要求。各种集电环的结构如图 1.4-13 所示。

金属环一般用青铜或低碳钢制成，高速电机的金属环用高强度合金钢制造。金属环的直径宽度，根据通过电流的大小、电刷数量、电刷尺寸及散热面积等因素，结合有关标准的规定选用。金属环之间的间隔应根据励磁绕组电压所需绝缘距离及安装刷握、电刷等零件所需空间决定。

当集电环表面的圆周速度为 30～70m/s 时，金属环接触表面的漆膜将引起电刷浮动，使电刷与金属环接触不良，电流分布不均而出现火花、电蚀，加速环的磨损和电刷发热。在金属环表面加工出螺旋槽可防止这种情况。当集电环通过的电流达 1000A 以上时，金属环应开通风孔加风扇，以加强环的冷却。

微特电机的集电环由塑料、金基合金环、与环焊牢的氟塑料引线塑压成一体［见图 1.4-13 (b)］。集电环内孔与轴用胶黏牢。环表面应抛光，以保证电刷接触可靠和减少摩擦。

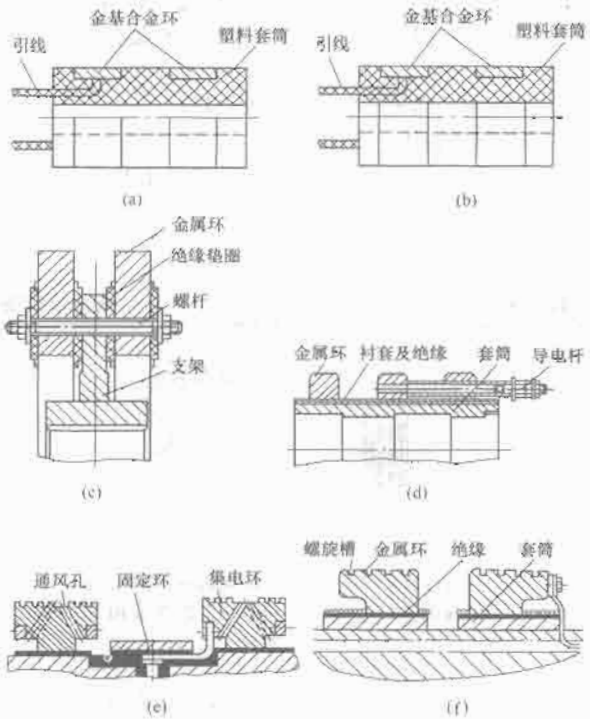


图 1.4-13 集电环结构

(a) 塑料集电环（用于小型电机）；(b) 塑料集电环（用于微型电机）；(c) 支架装配式集电环；(d) 套筒装配式集电环；(e) 高速集电环；(f) 高速大电流集电环

2.5 换向器

直流电机的换向器参见第 4 篇第 7 章。

2.6 风扇

电机的风扇参见本篇第 6 章。

3 辅助部分

3.1 轴承

3.1.1 滚动轴承

轴承噪声往往是电机噪声的重要因素。选用滚动轴承的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

主要依据是其所承受的负载，还与负载的方向有关。

常用滚动轴承的装配结构如图 1.4-14 所示。

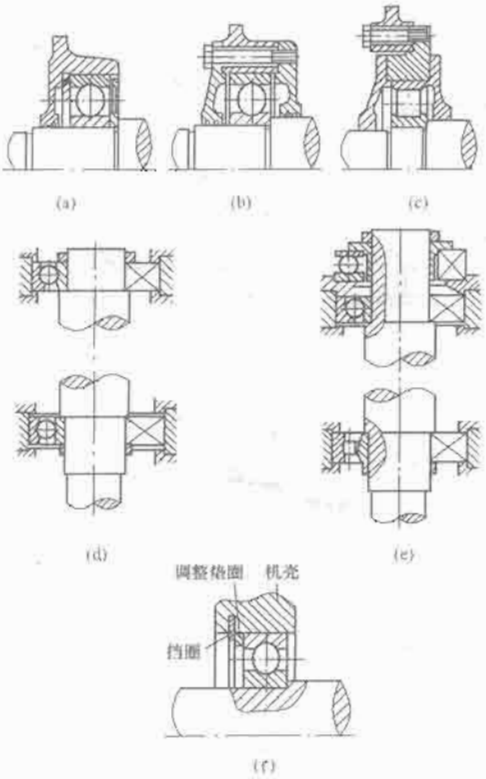


图 1.4-14 常用滚动轴承装配结构

(a) 用于小型异步电动机（重心高 160mm 及以下）；(b)、(c) 用于小型异步电动机（中心高 180mm 及以上）及中型电动机；(d)、(e) 用于立式电机；(f) 用于微特电机

在卧式电机中，对中心高为 160mm 及以下的小型电机，通常两端均选用单列向心球轴承；对中心高为 180～280mm 的 4、6、8 极的小型电机和中型电机，由于轴伸端轴承所承受的负载较大，选用单列向心短圆柱滚子轴承，非轴伸端选用球轴承，这样可使两端轴承寿命大致相同。

采用两只单列向心球轴承的小型电机，其非轴伸端的外圈被轴承盖夹紧，轴伸端的轴承与轴承盖间留有单边为 0.5mm 的间隙，当转子热膨胀时轴承不被卡住。中心高 160mm 以下的小型电机，在轴伸端轴承室中常装有波形弹簧片，对轴承施加一轴向预压紧力，使钢球在套圈中定位，减少对保持架的冲击。该力对防止电机异常振动有较好效果，但不能过大，否则导致轴承过热。预压紧力 F 可根据轴承内径 D_b(mm)按 $F=(4\sim6)D_b$(N)计算。

在立式电机中，轴承除承受电机运行时的径向负载外，还同时承受由转子重力产生的轴向负载。因此，按轴向负载大小，中型电机的非轴伸端可用一只单列角接触轴承[见图 1.4-14(d)]或以推力轴承和角接触轴承各一只组合使用[见图 1.4-14(e)]。轴伸端选用承受径向负载的球轴承或滚子轴承。小型立式电机的轴承一般与卧式电机的相同，不需装推力轴承。微特电机一般选用全封闭轴承，部分电机还选用不锈钢轴承，如图 1.4-14(e)、(f)所示。

3.1.2 滑动轴承

大中型卧式电机通常采用座式滑动轴承(有独立的轴承座)或端盖式滑动轴承(轴承在电机的端盖内)。大型立式电机则采用特殊结构推力轴承和导轴承。

(1) 座式滑动轴承

按支承方式、轴瓦与轴承座的配合面有圆柱面与球面等形式，如图 1.4-15 所示。它们与轴承座的配合直径分别为轴瓦内径 D_P 的 1.5 倍和 1.75 倍。轴瓦与轴颈的设计间隙取为(1/1000～1.5/1000) D_P (mm)。座式轴承的外形、安装尺寸、轴承与轴承座的配合尺寸及其精度均应符合 JB/T 743《电机用 Z 系列座式滑动轴承》标准的规定。

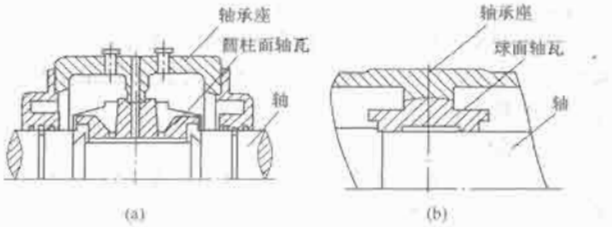


图 1.4-15 滑动轴承轴瓦结构示例

(a) 圆柱面轴瓦；(b) 球面轴瓦

球面配合的轴承适于转子较长、挠度大、转速高或承受一定轴向冲击负载的电机。球面宽度 $b_h=(0.4\sim0.62)D_P$ (mm)。

(2) 端盖式滑动轴承

卧式端盖式滑动轴承，通过凸缘固定在电机端盖上，可省去笨重的轴承座，结构紧凑，体积小，质量小。我国大中型交流电机用 DQ 系列端盖式滑动轴承在结构上有如下一些特点：

1) 使用范围大。有 A 型和 B 型两种，如图 1.4-16 所示。A 型用于整圆端盖的电机，用外止口定位固定在电机端盖上，便于安装，对气隙较大的直流电机和同步电机更为适用。B 型通常用于分瓣端盖的电机，因该类电机气隙小，电机总装时采用调气隙打定位销的工艺，采用分瓣端盖比较方便。

2) 自调心宽球面轴瓦能更好地保证瓦体和轴承座之间的热传导，提高对轴向力的承受能力。

3) 浮动密封环结构，提高了轴承的防漏油能力。

4) 为防止轴承室内和电机内部的压差引起的吸油现象，使油雾进入电机内部，安装了气封装置。

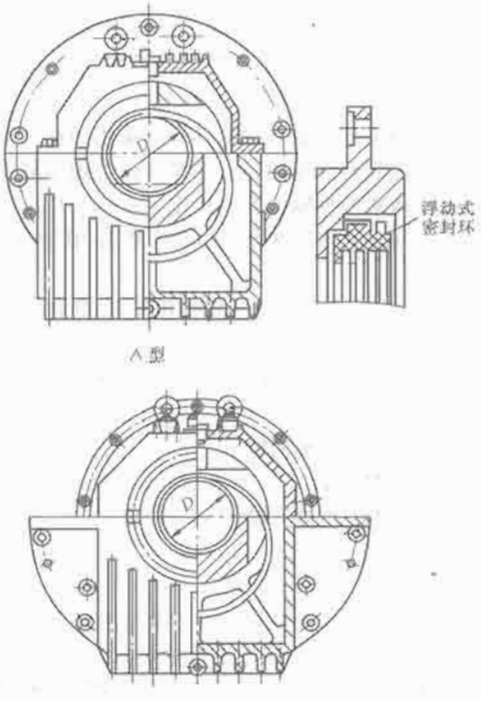


图 1.4-16 端盖式滑动轴承

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

5）轴承绝缘采用在轴承座的内球面上覆贴力学性能和电性能良好、摩擦系数较小的绝缘膜，如图 1.4-15（b）所示。

6）轴瓦为单油楔圆柱形，分有止推面及无止推面两种结构型式。

7）轴承合金直接浇注到瓦体上，瓦体和轴衬之间的结合面无纵横交叉的鸽尾槽，保证了结合品质。

该种轴承的规格、轴瓦精度、结构型式和对转轴的相应要求等，由 JB/T5888《电机用 PQ 系列滑动轴承结构与尺寸》标准规定。

（3）承载能力

为保证滑动轴承安全运行，温升不过高，轴承单位压力通常取 0.8～3.0MPa。具体取值与轴承结构、转速、润滑方式等有关，由电机设计者确定。

（4）高压油顶起系统

对单位压力较大或正、反转频繁的电机，为减少其动摩擦力矩，缩短起动时间，可考虑采用压力为 5～10MPa 的高压油顶起装置。对转速极低载荷较大的轴承，也可采用强迫润滑方式运行。

高压油顶起系统的结构如图 1.4-17 所示。其中高压油室的宽度 S、夹角 θ 以及供油压力 p_0 和流量等需要根据轴承尺寸、运行参数等确定。一般采用一个油室的结构，大轴承也可采用两个油室结构。

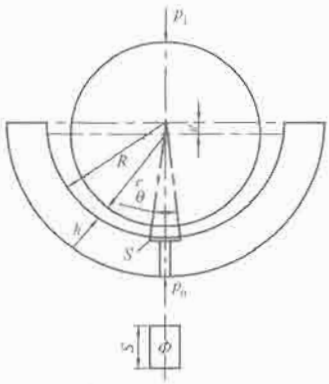


图 1.4-17 高压油顶起系统示意图

（5）润滑方式

座式滑动轴承和端盖式滑动轴承可采用油环、油盘带油润滑，压力加油润滑以及油环、油盘与压力加油复合润滑等方式。润滑油通常根据轴颈圆周速度（v_{sh}）选用。

当 $v_{sh} \leqslant 5$m/s 时，选用全损耗系统用油 L-AN-68，GB 433。

当 $5 < v_{sh} \leqslant 15$m/s 时，选用汽轮机油 L-TSA46，GB 11120。

当 $v_{sh} > 15$m/s 时，选用汽轮机油 L-TSA32，GB 11120。

（6）大型汽轮发电机的轴承

参见第 2 篇第 3 章。

（7）大型立式电机推力轴承和导轴承

参见第 2 篇第 4 章。

3.1.3 轴承绝缘

大型电机当磁路不对称（如扇形片分片不当，混用磁化性能不同的几种硅钢片，气隙不均匀等），同步电机励磁绕组发生两点接地，轴附近存在漏磁通等情况时，转子轴端之间可出现感应电压。如果轴承的油膜被击穿，形成电流通路时，轴瓦和轴颈将因流过轴电流而引起点状灼伤，严重时甚至破坏轴承的正常运行。为阻断轴电流的回路，通常在非传动端的轴承座下加绝缘垫，轴承座的固定螺钉也套上绝缘套管，如图 1.4-18（a）所示。此外，氢冷汽轮发电机的油密封，水内冷电机转子的进水支座和进水管法兰，采用无刷励磁的电机及其交流励磁发电机与汽轮发电机转子的连接处等，也都要绝缘。

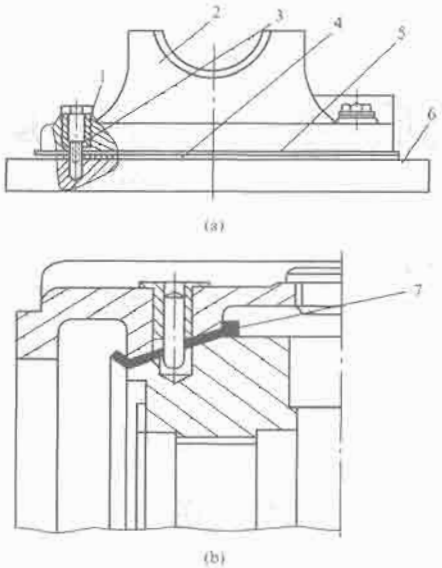


图 1.4-18 轴承绝缘

1—绝缘垫圈；2—轴承座；3—绝缘套管；4—绝缘垫片；5—薄钢板；6—底板；7—轴承绝缘

汽轮发电机转子与气体之间高速摩擦会引起静电积累而形成对地电位差。为了消除这种电位差以及可能还有来自汽轮机转子的静电积累，保证轴承的安全运行，通常在传动端的联轴器或轴承附近装接地电刷，将轴与地接通。

3.2 电刷装置

参见第 2 篇第 4 章和第 4 篇第 7 章。

3.3 冷却器

参见本篇第 6 章。

4 电机结构的机械设计基础

4.1 概述

电机结构的机械设计包括对主要零部件的强度、刚度、疲劳和振动的核算。在实际问题中根据结构和工况来选择计算内容。通过计算，合理选取各主要零部件的形状、尺寸和材料，使电机结构设计得既安全又经济。随着电机容量和参数的提高，上述计算越来越重要。

电机主要零部件的机械设计计算涉及一些物理量，其中常用的量值及其符号和单位见表 1.4-9。

表 1.4-9 机械设计计算量值、符号和单位

量 值	符 号	单 位
长度	l、L	m
质量	m	kg
时间	t	s
半径	r、R	m
直径	d、D	m

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

量 值	符 号	单 位
截面积	A、S	m^2
截面系数	W	m^3
惯性矩	I_a	m^4
极惯性矩	I_p	m^4
重力加速度	g	m/s^2
重力	G、w	N
力、载荷	F、P	N
离心力	C	N
磁拉力	Q	N
重度	γ	N/m^3
力矩、弯矩	M	N·m
扭矩、转矩	T	N·m
转动惯量	J	$kg·m^2$
气隙磁通密度	B_δ	T
温升	Δt	K
线胀系数	α_l	K^{-1}
摩擦系数	μ	
振动频率	f	Hz
圆频率	ω	s^{-1}
刚度	K、R、C	N/m
扭转刚度	K_t	N·m/rad
弯曲挠度	f、y	m
扭角、角位移	θ、φ	rad
应力、正应力	σ	Pa
切应力	τ	Pa
应变、正应变	ε	
切应变	γ	
弹性模量	E	Pa
切变模量	G	Pa
泊松比	ν	
屈服点	σ_s	Pa
强度极限	σ_b	Pa
持久极限	σ_{-1}	Pa
转速（转数）	n、N	r/min
角速度	ω	rad/s
功率	P	W
气隙长度	δ	m
振幅	A	m
相位	α、θ	
阻尼系数	C	N·s/m
密度	ρ	kg/m^3

4.2 金属材料的强度理论

工程上，金属材料的强度理论包括脆性材料强度理论、塑性材料强度理论和疲劳强度理论等。实用上，设计人员需要根据具体的应用情况，在试验研究的基础上，合理地运用不同的强度理论进行机械部件的强度分析。

4.2.1 脆性材料强度理论

脆性金属材料一般应用最大线变形理论。当主应力的大小顺序为 $\sigma_1 \leqslant \sigma_2 \leqslant \sigma_3$ 时，该理论的相当应力为

$$\sigma_{x.d} = \sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2) \tag{1.4-1}$$

式中，ν 为材料的泊松比。

4.2.2 塑性材料的强度理论

常温下的塑性材料承受静载荷时，用以下两个常用的强度理论，在工程问题中可随意选用。

1）最大应力理论。当主应力按 $\sigma_1 \leqslant \sigma_2 \leqslant \sigma_3$ 的大小顺序排列时，相当应力为

$$\sigma_{x.d} = \sigma_3 - \sigma_1 \tag{1.4-2}$$

2）形变比能理论。该理论的强度准则可用下式表示

$$\sigma_i < \sigma_s \tag{1.4-3}$$

式中，σ_i 为等效应力，可用主应力分量表示为

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2 + (\sigma_3-\sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \tag{1.4-4}$$

亦可用普通应力分量表示为

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_x-\sigma_y)^2 + (\sigma_y-\sigma_z)^2 + (\sigma_z-\sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}} \tag{1.4-5}$$

4.2.3 疲劳强度理论

塑性材料受到交变载荷作用时，应按疲劳理论校核强度。

在单向交变应力情况下，材料的强度决定于一个应力循环中的平均应力 σ_{av} 和应力幅值 σ_a。对称循环时 $\sigma_{av}=0$，材料的破坏只与 σ_a 有关，它的极限值 σ_{-1} 称为持久极限。当 $\sigma_a < \sigma_{-1}$ 时，材料可经受无限次应力循环而不破坏。当 $\sigma_a > \sigma_{-1}$ 时，裂纹不断扩展，材料可经受有限次应力循环 n 便可发生突然断裂。这种情况称为低周疲劳，疲劳的寿命应根据由材料标准式样得出的 σ—n 曲线确定。非对称循环时，材料的疲劳强度决定于 σ_{av} 和 σ_a 的极限关系。根据实验资料，可以取线性的极限关系

$$\frac{\sigma_{av}}{\sigma_b} + \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} < 1 \tag{1.4-6}$$

非对称循环时，低周疲劳的 σ—n 曲线应考虑 σ_{av} 的影响。

复合应力情况下材料的疲劳行为很复杂，它的一般规律尚未被发现。根据实验资料，仅在各应力分量按比例变化时，符合形变比能理论的规律，对称循环时的疲劳强度准则为

$$\sigma_i < \sigma_{-1} \tag{1.4-7}$$

4.3 安全系数

由于各种原因，任何强度计算总难免带一些不可靠性，必须选取一定的安全系数。各种强度准则可用应力分量 σ_{ij} 的组合函数 $f(\sigma_{ij})$ 和材料强度指标 σ_0 统一表示如下

$$f(\sigma_{ij}) < \sigma_0 \tag{1.4-8}$$

使用安全系数 n 又可将它写成准确的形式

$$f(\sigma_{ij}) \leqslant \frac{\sigma_0}{n} \tag{1.4-9}$$

式中，σ_0/n 为许用应力，记作 $[\sigma]$。

安全系数 n 的选取，一般需要考虑计算方法的精度、构件的材料特性和缺陷情况，载荷的性质和准确性、环境条件的变化、部件加工偏差及其重要程度等。这些因素都带有一定的不确定性。因此，正确的选取安全系数是非常困难的，在很大程度上依赖于设计人员的经验和判断力。表 1.4-10 列出了一些电机零部件的平均应力安全系数。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.4-10 电机零部件平均应力安全系数

电机	零部件名称及计算项目	安全系数
水轮发电机	转子磁轭拉应力	1.35
	磁极 T 尾拉应力	1.1
	大轴极限承载能力	2
	转子支架合缝螺栓拉应力	1.8
	机座定位筋焊缝应力	1.4
	负重机架合缝螺栓拉应力	1.8
汽轮发电机	转子齿根拉应力	1.8
	转子齿冠拉应力	1.8
	转子中心孔应力	1.4
	转子护环应力	1.6
	突然短路时轴颈扭应力	1.25
	机座定位筋焊缝应力	1.4
直流电机	换向片弯曲应力	2

4.4 断裂力学概念

断裂力学研究材料由裂纹的失稳扩展引起的低应力脆断问题。它应用显弹性力学的分析方法，综合考虑应力和裂纹的效应，用应力强度因子 K 描述裂纹前沿应力场，认为材料在常温下当 K 值达到其临界值 K_c 时，就会发生裂纹的失稳扩展而导致低应力脆断。

裂纹按其表面位移有三种基本类型。其中按拉应力垂直于裂纹表面的平面应变类型的裂纹最为重要，称为Ⅰ型裂纹。这类裂纹前沿为三向应力状态，最易发生脆断。在断裂力学中就以这类裂纹的临界应力强度因子 K_{Ic} 作为裂纹失稳扩展的阈值，称作材料的断裂韧度。

断裂韧度 K_{Ic} 是材料强度的一项强度指标，由专门的试验测定。各种材料的 K_{Ic} 值得测定时断裂力学应用的基础。

4.5 常用应力集中系数

在电机零部件的强度计算中，常用的有以下几种情况的应力集中系数（曲线）（见图 1.4-19～图 1.4-22）。

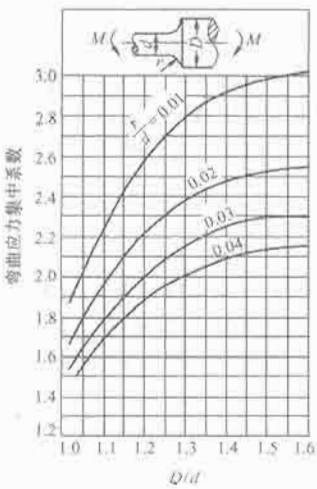


图 1.4-19 弯曲时的应力集中系数

1）阶梯轴在过渡圆角处的应力集中系数。弯曲时的应力集中系数可从图 1.4-19 查取。扭转时的应力集中系数可从图 1.4-20 查取。

2）轴在环形半圆槽处的应力集中系数。

弯曲时的应力集中系数

$$\alpha_\sigma = 1 + \xi(\alpha - 1) \tag{1.4-10}$$

式中，α 及 ξ 分别从图 1.4-21、图 1.4-22 中查取。

扭转时的应力集中系数

$$\alpha_\tau = 1 + 0.6(\alpha_\sigma - 1) \tag{1.4-11}$$

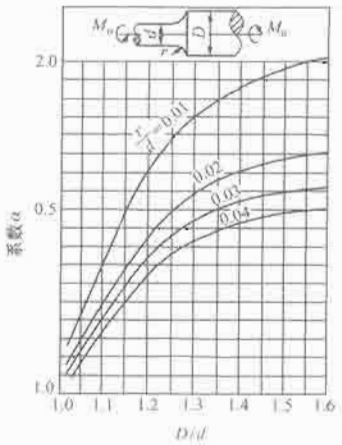


图 1.4-20 典型情况的系数 α

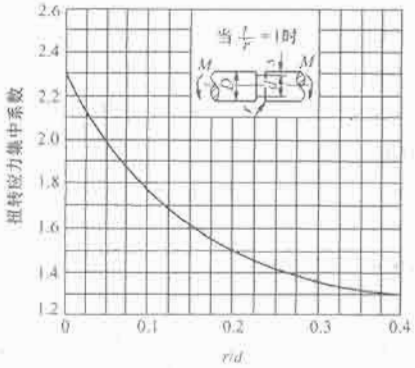


图 1.4-21 扭转时的应力集中系数

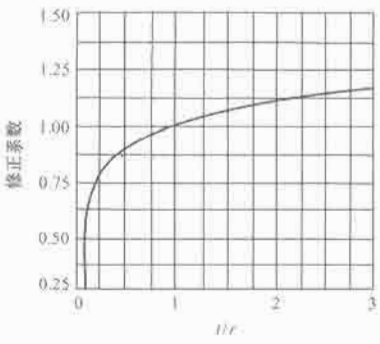


图 1.4-22 修正系数

5 主要零部件的常用机械算法

数值方法是机械分析的准确有效手段，一般情况下，应予以优先选用。但在初步设计阶段，某些常用算法也可以给出快速有效的结果。

本节计算公式中的变量符号见表 1.4-9。

5.1 机械设计常用计算公式

（1）离心力计算公式

$$C = mR\omega^2 = mR\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 \tag{1.4-12}$$

式中，C 为离心力，N；m 为旋转体质量，kg；R 为旋转体重心半径，m；ω 为旋转角速度，rad/s；n 为转速，r/min。

（2）磁拉力计算公式

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

由定转子偏心引起的单边磁拉力

$$Q=9.8\times10^4\pi D_i l\frac{e}{\delta}\left(\frac{B_\delta}{0.5}\right)^2 \tag{1.4-13}$$

式中，Q 为磁拉力，N；D_i 为定子铁心内径，m；l 为定子铁心长度，m；e 为定、转子间偏心值，mm；δ 为定、转子平均气隙，mm；B_δ 为平均气隙磁通密度，T。

(3) 额定扭矩计算公式

$$T_N=9549\frac{S_N}{n_N} \tag{1.4-14}$$

式中，T_N 为额定扭矩，N·m；S_N 为电机额定视在功率，kVA；n_N 为额定转速，r/min。

5.2 固定部分机械设计计算

5.2.1 定子振动的计算

(1) 卧式电机定子的固有频率

常用卧式交、直流电机定子的振动值较小，只需计算固定频率。又因为它们的机座刚度较大，可以忽略铁心刚度的作用。

1) 横向摆振。这是定子在水平面内的横向摇摆振动，其最低阶固有频率由下式给出

$$f=\frac{C(\alpha)}{\sqrt{2}\pi}\sqrt{\frac{EI_a}{mR^3}} \tag{1.4-15}$$

式中，f 为最低阶固有频率，Hz；α 为自机座顶点至底脚圆弧的中心角，如图 1.4-23 所示；$C(\alpha)$ 为随 α 角变化的系数，见表 1.4-11；E 为机座弹性模量，取 2.06×10^{11} Pa；I_a 为机座截面惯性矩，m^4；m 为定子装配总质量（直流电机包括磁极质量），kg；R 为机座重心半径，m。

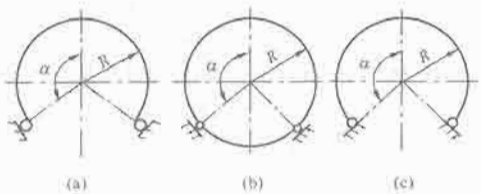


图 1.4-23 机座结构及底脚支撑示意图
(a) 部分环铰支定子；(b) 整圆环铰支定子；
(c) 部分环固支定子

表 1.4-11 系数 $C(\alpha)$ 的数值

α		100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°
$C(\alpha)$	a	1.60	1.15	0.80	0.60	0.35	0.25	0.20	0.10
	b	2.05	1.60	1.20	0.90	0.75	0.70	0.65	0.60
	c	3.35	2.60	1.95	1.60	1.20	0.95	0.80	0.65

2) 弯挠振动。这是定子在其圆环面内的弯曲振动。定子圆环弯曲成梅花形，称为定子振型。该振型中的节点对数（节点数之半）称为振型阶数。对应于第 n 阶振型的固有频率 f_n 称为第 n 阶固有频率，可按下式计算

$$f_n=\frac{n(n^2-1)}{\sqrt{n^2+1}}\sqrt{\frac{EI_a}{2\pi mR^3}} \tag{1.4-16}$$

(2) 大型同步发电机的磁振动

大型同步发电机（水轮和汽轮发电机）定子的磁振动是由脉冲的分布磁拉力引起的弯挠振动。这种振动需要同时计算固有频率和振动响应，并要考虑铁心刚度的作用。铁心轭部和机座可看作用弹簧（定位筋）耦合的两个同心圆环，铁心齿部和槽内线棒则看成是附加质量。当采用刚性定位筋时，该耦合系统的第 n 阶固有频率可由下式求得

$$f_n=\frac{n(n^2-1)}{\sqrt{n^2+1}}\sqrt{\frac{K_1+K_2}{2\pi(m_1+m_2)}} \tag{1.4-17}$$

$$K_1=\frac{E_1 I_{a1}}{R_1^3}$$

$$K_2=\frac{E_2 I_{a2}}{R_2^3}$$

式中，f_n 为固有频率，Hz；K_1 为铁心轭部刚度，N/m；K_2 为机座刚度，N/m；m_1 为铁心装配质量，kg；m_2 为机座装配质量，kg；E_1 为铁心弹性模量，整圆定子取 1.47×10^{11} Pa，分瓣定子取 1.27×10^{11} Pa；I_{a1} 为铁心轭部截面惯性矩，m^4；R_1 为铁心轭部重心半径，m；E_2 为机座弹簧模量，取 2.06×10^{11} Pa；I_{a2} 为机座截面惯性矩，m^4；R_2 为机座重心半径，m。

作用于铁心内表面的分布磁拉力是一系列节点数不等的力波，节点对数称为力波次数。这些力波引起上述耦合系统的一系列响应的振动波。在刚性定位筋情况下，铁心和机座的响应值相等，第 n 次响应为

$$A_n=\frac{F_n R_1 l\times10^6}{(K_1+K_2)(n^2-1)^2\left[1-\left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right]} \tag{1.4-18}$$

式中，A_n 为第 n 次响应，μm；F_n 为第 n 次力波幅值，Pa；R_1 为铁心内圆半径，m；l 为铁心长度，m；f 为干扰力波频率，可取为 100Hz。

1) 水轮发电机定子磁振动计算水轮发电机定子的磁振动是由分数槽绕组磁动势次谐波引起的低次振动。实际出现的力波幅值 F_n 及次数 n 与电磁方案有关，由电磁计算给出。

在确定力波的次数 n 及其幅值 F_n 之后，便可应用式 (1.4-17) 和式 (1.4-18) 计算相应的固有频率 f_n 和响应 A_n。由式 (1.4-18) 可知，随着力波次数 n 的增大，响应 A_n 的值差不多与 n^4 成反比而减小，故只需要计算次数较低的几个力波和由它们引起的振动，一般计算到 A_n 的绝对值小于 0.01μm 时即可。定子的最大振动值 A 可以取为

$$A=\sum|A_n| \tag{1.4-19}$$

水轮发电机定子的振动标准一般为 $A\leqslant10\mu m$，对于现代大型水轮发电机，可以取 $A\leqslant15\mu m$。

2) 汽轮发电机定子磁振动计算。汽轮发电机一般采用整数槽。它的磁振动是由主磁场引起的单一波形的弯挠振动。对于两极电机，可在式 (1.4-17) 和式 (1.4-18) 中取 $n=2$ 来计算定子的固有频率 f_2 和响应 A_2；对于四极电机，则取 $n=4$ 来计算 f_4 和 A_4。力波幅值 F_2 或 F_4 由电磁计算给出。

为了减少定子振动，以减轻基础受到的振动力，应将定子机座的刚度 K_2 设计的大一些，使固有频率 f_2 和 f_4 落在 100Hz 以上。振动标准可以取为 A_2（或 A_4）$\leqslant12.5\mu m$。

3) 减小定子磁振动的措施 为使大型同步发电机定子的磁振动振幅不超过标准，可以在设计中采取下列措施：

①对于水轮发电机定子，可通过调整电磁方案来减小力波幅值 F_n，特别是减小那些次数较低且与靠近 100Hz 的固有频率相对应的力波幅值，作用比较显着。

②当水轮发电机定子采用单层波绕组而振动比较大时，可考虑采用双层绕组。

③调整定子的结构参数，使各阶固有频率尽可能避开 100Hz。

④对于汽轮发电机定子，增加机座刚度和铁心轭高，可在提高固有频率的同时减小振动幅值。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

5.2.2 水轮发电机定子机座刚度条件

为了使水轮发电机定子保持一定的圆度，其机座需要满足下列条件：

定子分瓣放置、起吊和顶动时的刚度条件为

$$\frac{EI_a}{R} \geqslant 100C_nG \tag{1.4-20}$$

运行中考虑定子曲率变化的刚度条件

$$\frac{EI_a}{R} \geqslant 1127D_il\left(\frac{B_\delta}{0.7}\right)^2 \times 10^4 \tag{1.4-21}$$

运行中考虑定子弯曲挠度的刚度条件

$$\frac{EI_a}{R^3} \geqslant 4900\frac{D_il}{\delta}\left(\frac{B_\delta}{0.7}\right)^2 \tag{1.4-22}$$

式中，E 为机座弹性模量，取 2.06×10^{11} Pa；I_a 为机座截面惯性矩，m^4；R 为机座重心半径，m；C_n 为随定子分瓣数 n 变化的系数，可由表 1.4-12 查得；G 为定子装配总重力，N；D_i 为定子铁心半径，m；l 为定子铁心长度，m；B_δ 为平均气隙磁通密度，T；δ 为单边气隙长度，m。

表 1.4-12 系数 C_n 的数值表

n	2	3	4	≥6
C_n	4.144	1.985	1.113	1.100

5.2.3 定子的热膨胀力

由于定子铁心的热膨胀，使各定位筋受到如下的总挤压力 Q_t（N）的作用

$$Q_t = \frac{2\pi(\Delta R_{t0} - \Delta R_t - \Delta - \Delta R_M + \Delta R_\mu)}{\frac{R_0}{(E_0A_0)} + \frac{R}{(EA)}} \tag{1.4-23}$$

式中，ΔR_{t0} 为温升引起的铁心半径增量，mm；ΔR_t 为温升引起的机座半径增量，mm；Δ 为铁心与定位筋的配合间隙，mm；ΔR_M 为磁拉力引起铁心半径减量，mm；ΔR_μ 为摩擦力引起机座半径减量，mm；R_0 为铁心轭部重心半径，mm；E_0 为铁心弹性模量，取 1.47×10^5 MPa；A_0 为铁心轭部截面积，mm^2；R 为机座重心半径，mm；E 为机座弹性模量，取 2.06×10^5 MPa；A 为机座截面积，mm^2。

5.3 电机轴的强度计算

5.3.1 轴的一般强度问题

电机轴的主要作用是传递扭矩和支持转子重力。所以对各种电机的轴，原则上要计算它的扭应力及其在转子重力、离心力和磁拉力等作用下的弯曲应力和拉应力。另外，还需要计算各种连接件的应力。

各种电机轴的结构形状和轴承布置情况各不相同，但它们在扭矩的作用下有一个共同的薄弱部位，即传递扭矩一端的轴颈。确定轴颈的尺寸是整个轴的设计基础。

在轴颈的扭应力计算中通常取超载时扭矩 T_K，它等于额定扭矩 T_N（N·mm）乘以超载倍数 k，即

$$T_K = kT_N \tag{1.4-24}$$

超载倍数 k 或者取规定的值，或者取 $1/X_d''$（X_d'' 为初始瞬态电抗的标么值），视电机类型而定。大型汽轮发电机则通过扭矩计算来确定 k 值。

设用 W_n 表示轴颈的抗扭截面系数（mm^3），则轴颈的扭应力 τ（MPa）由下式求得

$$\tau = \frac{T_K}{W_n} \tag{1.4-25}$$

在法兰连接处，连接螺栓或销钉的切应力等于扭矩 T_K 除以螺栓或销钉的总截面积与它们的分布半径的乘积。

在转子轮毂与轴配合处，存在很大的摩擦力，可以取额定转矩 T_N 来计算键的切应力。它等于 T_N 除以键的剪切面积与轴半径的乘积。

以上各应力所需要的安全系数一般较小，如汽轮发电机轴颈的安全系数为 1.25，个别电机甚至小于 1.2。轴的弯曲应力和拉应力都比较小，一般情况下可不计算。

5.3.2 汽轮发电机转子齿应力计算

汽轮发电机设计主要关心转子齿的强度问题。转子齿根拉应力 σ_1 和齿冠拉应力 σ_2 分别计算如下

$$\sigma_1 = \frac{C_1 + C_3}{b_1} \tag{1.4-26}$$

$$\sigma_2 = \frac{C_2 + C_3}{b_2} \tag{1.4-27}$$

式中，σ_1 为齿根拉应力，MPa；σ_2 为齿冠拉应力，MPa；C_1 为整个齿单位长度的离心力，N/mm；C_2 为齿冠单位长度的离心力，N/mm；C_3 为槽内线棒和槽楔单位长度的离心力，N/mm；b_1 为齿根截面宽度，mm；b_2 为齿冠颈部截面宽度，mm。

齿冠鸽尾部分的切应力为

$$\tau = \frac{C_3}{2h} \tag{1.4-28}$$

式中，τ 为鸽尾部分的切应力，MPa；h 为鸽尾翼部最大径向高度，mm。

以上各应力都要在超速下计算，它们对于材料屈服点的安全系数都不得小于 1.8。

5.3.3 水轮发电机轴的极限强度

水轮发电机大轴与轮毂配合段内承受径向配合力 Q、轴向拉力 P 和扭矩 T 的作用。当轮毂采取热套（冷缩）配合时，为了靠摩擦力传递扭矩，所确定的过盈量应满足

$$Q_N fD \geqslant 6T_N \tag{1.4-29}$$

式中，Q_N 为额定转速时的径向配合力，N；f 为摩擦系数，取 0.2；D 为大轴配合段外径，m；T_N 为额定转矩，N·m。

热套时大轴配合段在任意转速下对于极限状态的强度条件

$$\sqrt{\left(\frac{Q}{Q_s}\right)^2 + \left(\frac{P}{P_s}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_s}\right)^2} \leqslant \frac{1}{2} \tag{1.4-30}$$

$$Q_s = 2\pi Dl(1-\alpha)\sigma_s$$

$$P_s = \frac{\pi}{4}D^2(1-\alpha^2)\sigma_s$$

$$T_s = \frac{\pi}{12}D^2(1-\alpha^3)\frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$$

式中，l 为大轴与轮毂配合段长度，m；α 为大轴配合段的内外径之比；σ_s 为大轴材料的屈服点，Pa。

5.4 转子的临界转速

在电机升速过程中，转子振动最大时的转速，称为转子临界转速，在数值上，它等于轴的横向振动的固有频率。

考虑一个简单转子的临界转速问题。设轴上只有一个集中质量，其大小为 m，偏心距为 e，无论轴承的数量和布置情况如何，轴总要发生弯曲变形。设轴在质量 m 处的挠度为 y。它将会产生一个离心力 $m(y+e)\omega^2$。该离心力与轴的弹性恢复力 ky 相平衡，k 为轴的弯曲刚度。因此得到质量 m 的平衡方程如下

$$m(y+e)\omega^2 = ky$$

由此方程解出挠度 y，得

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$y=\frac{e\omega^2}{(\omega_0^2-\omega^2)}$$

$$\omega_0=\sqrt{\frac{k}{m}}$$

式中，ω_0 为轴横向振动的固有圆频率。

显然，当 ω 趋近 ω_0 时，y 将趋近无穷大。实际上由于阻尼的作用，y 只能达到一个有限值，这时表现为轴的剧烈振动。由此得到转子的临界角速度

$$\omega_{cr}=\omega_0=\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1.4-31}$$

临界转速的常规计算方法可在任何一本讨论振动的书中找到。

对于截面变化比较复杂和轴承数较多的轴，这种计算方法是很烦琐的。随着电子计算机的普及，现在一般采用下述的传递矩阵法来计算轴和轴系的临界转速。

首先把轴和轴系划分为 n 个等截面轴段，并按静力等效原则将各轴段的质量折算到各轴段的两端。对任意的第 i 轴段有传递矩阵

$$\boldsymbol{A}_i=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & m_{i-1}\omega^2\\ l_i & 1 & 0 & l_i m_{i-1}\omega^2\\ \dfrac{\beta_i l_i}{2} & \beta_i & 1 & \dfrac{\beta_i l_i m_{i-1}\omega^2}{2}\\ \dfrac{\beta_i l_i^2}{6} & \dfrac{\beta_i l_i}{2} & l_i & \dfrac{1+\beta_i l_i^2 m_{i-1}\omega^2}{6}\end{bmatrix} \tag{1.4-32}$$

$$\beta_i=\frac{l_i}{EI_i}$$

式中，m_{i-1} 为第 i 轴段始端的集中质量，kg；ω 为转子旋转角速度，rad/s；l_i 为第 i 轴段长度，m；β_i 为第 i 轴段的刚度系数，1/（Nm）；E 为弹性模量，Pa；I_i 为第 i 轴段的截面惯性矩，m^4。

传递矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 给出下列的传递关系

$$\boldsymbol{X}_i=\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{X}_{i-1}$$

$$\boldsymbol{X}_i=[Q_i,M_i,\theta_i,y_i]^{\mathrm{T}}$$

式中，$\boldsymbol{X}_i$ 为第 i 轴段的状态向量；Q_i 为第 i 轴段末端的切力，N；M_i 为第 i 轴段末端的弯矩，N·m；θ_i 为第 i 轴段末端相对于始端的转角；y_i 为第 i 轴段末端相对于始端的挠度，m。

如果第 j 轴段始端有弹性支座，刚度为 R_{j-1}，则传递关系变为

$$\boldsymbol{X}_j=\boldsymbol{A}_j\boldsymbol{K}_{j-1}\boldsymbol{X}_{j-1}$$

式中，$\boldsymbol{K}_{j-1}$ 为表示弹性支座支撑作用的矩阵，如下式所示

$$\boldsymbol{K}_{j-1}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & -k_{j-1}\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{1.4-33}$$

根据上述传递关系，可将整个轴系始端的力学参数 X_0 传递到轴系末端，即有

$$\boldsymbol{X}_n=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}_0$$

$$\boldsymbol{A}=K_nA_nA_{n-1}\cdot\cdots\cdot A_jK_{j-1}A_{j-1}\cdot\cdots\cdot A_2A_1K_0 \tag{1.4-34}$$

矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是一个四阶方阵，设用 a_{ij} 表示矩阵 A 的元素，根据轴系的端点条件可以导出特征方程，如下式所示

$$\begin{vmatrix}a_{13} & a_{14}\\ a_{23} & a_{24}\end{vmatrix}=0 \tag{1.4-35}$$

这个方程的根便给出轴系的前 n 个临界角速度

$$\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n$$

利用上述传递关系又可求出相应的振型

$$(y_0,y_1,\cdots,y_n)_s\quad s=1,2,\cdots,n$$

上述计算方法称为普劳尔（Prohl）法。它的逻辑简单，适用于电子计算机计算，但是计算振型时可能误差很大。为改善这种情况，可将传递矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 分块处理，即将它分解为四个二阶的矩阵块 T_{ij} 而写成如下形式

$$\boldsymbol{A}_i=\begin{bmatrix}T_{11} & T_{12}\\ T_{21} & T_{22}\end{bmatrix}_{i-1}$$

这样可将传递关系用内力向量 $[\boldsymbol{Q},\boldsymbol{M}]^{\mathrm{T}}$ 和变形向量 $[\theta,y]^{\mathrm{T}}$ 写出。设用 $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{u}$ 表示这两个向量，传递关系可以写成

$$\begin{bmatrix}P\\ u\end{bmatrix}_{i+1}=\begin{bmatrix}T_{11} & T_{12}\\ T_{21} & T_{22}\end{bmatrix}_i\begin{bmatrix}P\\ u\end{bmatrix}_i$$

形式上建立向量 $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{u}$ 之间的变换关系为

$$\boldsymbol{P}_i=\boldsymbol{s}_i\boldsymbol{u}_i \tag{1.4-36}$$

可以得到下列递推关系

$$S_{i+1}=(T_{11}S+T_{12})_i(T_{21}S+T_{22})_i^{-1}$$

$$u_{i+1}=(T_{21}S+T_{22})_iu_i$$

在轴系始端有 $P_0=0$，故可取 $S_0=0$。由第一个递推关系，可以求得 $S_1,S_2,\cdots,S_n$。在轴系末端又有 $P_n=0$，由此可以得到特征方程

$$|S_n|=0 \tag{1.4-37}$$

该行列式方程的根便给出临界角速度。对应的振型可由第二递推关系求得。

上述计算方法称为里卡提（Riccati）法。它提高了计算精度，但要缩小步长以防止丢根。该方法还可以用来计算不平衡响应，即轴系对于质量不平衡力系的响应。

5.5 转子的动平衡

刚性转子可用两平面影响系数法进行动平衡。在转子上任取两个平衡平面Ⅰ、Ⅱ和两个测面A、B。平衡前先在某一转速下测出这两点的振动向量 $\boldsymbol{A}_0$、$\boldsymbol{B}_0$ 作为原始数据。然后在平面Ⅰ上加一校正质量 Q_1，在同一转速下测出振动向量 $\boldsymbol{A}_1$、$\boldsymbol{B}_1$，得效果向量 $\boldsymbol{A}_1-\boldsymbol{A}_0$、$\boldsymbol{B}_1-\boldsymbol{B}_0$。方位角为零时单位质量的效果向量称为影响系数，记作 α_1、β_1。同样，在平面Ⅱ上加校正质量 Q_2 得影响系数 α_2、β_2。于是，校正平面Ⅰ、Ⅱ上所需的平衡质量 $\boldsymbol{P}_1$、$\boldsymbol{P}_2$ 可由向量方程组

$$\begin{cases}\alpha_1P_1+\alpha_2P_2=-A_0\\ \beta_1P_1+\beta_2P_2=-B_0\end{cases} \tag{1.4-38}$$

的解得到。

柔性转子的动平衡，需要在不同的转速下多次进行多点平衡。常用有以下两种动平衡方法：

1）振型平衡法。将转子的不平衡量按主振型分解成一系列不平衡分量，每个分量只能激起转子的相应于一个主振型的振动。由低阶到高阶逐个将这些分量平衡掉，转子便可在一定的转速范围内获得平衡。

此法在临界转速上进行时很难得到稳定的测试数据，故常取80%～90%临界转速作为平衡转速，但这样又不能很好的分离主振型。采取多点测振连续检测，并绘制模态回应圆的方法，能很好地分离主振型，可期望减少起动次数，提高平衡精度。

2）影响系数法。这种刚性转子两平面影响系数法推广。对柔性转子必须增加校正平面和平衡转速的数目，校正平面数应等于测点数与平衡转速数的乘积。实际转子有时不能提供这样多的校正平面，这时可用最小二乘法来达到使残余振动最小的目标，但不能将不平衡分量全部平衡掉。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

5.6 转子强度计算

(1) 转子磁轭的强度计算

水轮发电机的转子轭部在整体上可以看作圆环形部件，它在飞逸转速时的周向拉应力可按下式计算

$$\sigma_t = \frac{Z_0 C_y}{2\pi Z(Z_0-1)hb_{min}} \tag{1.4-39}$$

式中，σ_t 为周向拉应力，MPa；Z_0 为单元磁轭冲片层数；C_y 为飞逸转速时磁轭磁极离心力，N；Z 为磁轭冲片总层数；h 为每层冲片厚度，mm；b_{min} 为冲片最小径向宽度，mm。

磁轭应力对于屈服点安全系数一般取 1.35。

(2) 磁极铁心强度计算

水轮发电机或其他凸极同步电机，在飞逸转速情况下，每极单位长度的离心力

$$C = C_{c0} + 2N_m C_w \tag{1.4-40}$$

式中，C 为单位长度离心力，N/mm；C_{c0} 为磁极铁心单位长度的离心力，N/mm；N_m 为磁极线圈匝数；C_w 为每匝线圈单位长度的离心力，N/mm。

磁极 T 尾颈部拉应力和翼部切应力

$$\sigma = \frac{C}{nb} \tag{1.4-41}$$

$$\tau = \frac{C}{2nh} \tag{1.4-42}$$

式中，σ 为 T 尾颈部拉应力，MPa；τ 为 T 尾翼部切应力，MPa；n 为每极 T 尾数；b 为 T 尾颈部宽度，mm；h 为 T 尾翼部高度，mm。

这些应力的许用值，不能超过 T 尾失稳翘曲的临界应力，由试验测定。在 T 尾翼部加焊缝，可提高它的临界应力。

对于磁极极靴，通常只计算它的危险截面（见图 1.4-24 中的 AA 面）的弯曲应力。

$$\sigma_A = \frac{\sigma}{a^2}(C_{b0} l_1 + N_m C_w l_2) \tag{1.4-43}$$

式中，σ_A 为弯曲应力，MPa；C_{b0} 为每侧磁靴单位长度的离心力，N/mm。

此应力的许用值也是由试验测定。

磁极压板的几何形状都比较复杂，它的常规计算方法不够准确，又很烦琐，可采用有限单元法进行计算。

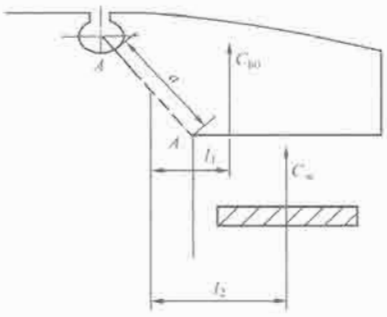


图 1.4-24 极靴应力计算简图

(3) 磁极线圈强度计算

水轮发电机及其他凸极同步电机磁极线圈的侧部，在自身的离心力作用下将会产生侧向弯曲变形。沿磁极中心线剖开的半匝线圈的几何形状如图 1.4-25 所示。

在飞逸转速或超速情况下，线圈侧部单位长度的离心力的侧向分量为

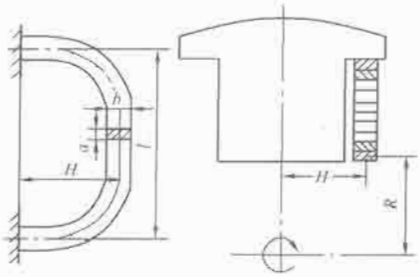


图 1.4-25 磁极线圈计算简图

$$q = \rho A \left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 (H - \mu R) \tag{1.4-44}$$

式中，q 为单位长度的离心力的侧向分量，N/mm；ρ 为线圈材料密度，g/cm³；A 为线圈截面积，mm²；n 为水轮发电机取飞逸转速，其他凸极同步电机取超速，r/min；μ 为匝间摩擦系数，取 0.05。

线圈侧部的最大弯曲应力 σ_{max} 和最大弯曲挠度 y_{max} 分别为

$$\sigma_{max} = \frac{ql^2 X_c}{12 I_{ac}} \tag{1.4-45}$$

$$y_{max} = \frac{ql^4}{384 E I_{ac}} \tag{1.4-46}$$

式中，σ_{max} 为最大弯曲应力，MPa；y_{max} 为最大弯曲挠度，mm；X_c 为线圈截面重心位置参数，mm；I_{ac} 为线圈截面惯性矩，mm⁴；E 为线圈材料弹性模量，MPa。

线圈强度条件和刚度条件分别为

$$\sigma_{max} \leqslant \frac{\sigma_b}{3}$$

$$y_{max} \leqslant \frac{l}{1000}$$

式中，σ_b 为线圈材料抗拉强度，MPa。

当这两个条件之一得不到满足时，便需要加装撑块或围带。

(4) 阻尼环的强度计算

低速电机的阻尼环完全靠阻尼条支撑，各段阻尼环之间用软铜片连接，如图 1.4-26 所示。

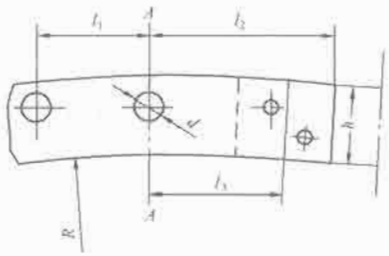


图 1.4-26 阻尼绕组计算简图

阻尼环各段的离心力

$$C_1 = \frac{m_1 l_1}{2}\left(R + \frac{h}{2}\right)\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 \times 10^{-3}$$

$$C_2 = m_1 l_2 \left(R + \frac{h}{2}\right)\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 \times 10^{-3}$$

$$C_3 = \frac{m_2}{2}\left(R + \frac{h}{2}\right)\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 \times 10^{-3}$$

式中，m_1 为阻尼环单位长度的质量，kg/mm；n 为飞逸（或超速）转速，r/min；m_2 为阻尼环连接片及连接螺钉质量，kg。

截面 A-A 处阻尼条切应力

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$\tau=\frac{C_1+C_2+C_3}{\frac{\pi}{4}d^2} \tag{1.4-47}$$

许用应力 $[\tau]=0.3\sigma_s$，σ_s 为材料屈服点。

阻尼环截面 A-A 处弯曲应力

$$\sigma=\left(C_2\frac{l_2}{2}+C_3 l_3\right)\frac{y_c}{I_a} \tag{1.4-48}$$

式中，σ 为弯曲应力，MPa；y_c 为截面 A-A 重心至阻尼环内圆距离，mm；I_a 为截面 A-A 的惯性矩，mm^4。

许用应力 $[\sigma]=0.8\sigma_s$。

对转速较高的电机，各段阻尼环之间采用硬连接。根据阻尼环的胀大变形计算阻尼条的切应力。阻尼环改为计算拉应力

$$\sigma=\frac{C_1}{2\pi A} \tag{1.4-49}$$

式中，σ 为计算拉应力，MPa；C_1 为阻尼环与连接片的总离心力，N；A 为阻尼环与连接片的最小截面积，mm^2。

许用应力 $[\sigma]=0.5\sigma_s$。

高速电机用无磁性护环支承阻尼环，或者将阻尼绕组安置在槽内用槽楔固定。这时要计算的是护环或者槽楔的强度。

(5) 拱形换向器的强度计算

拱形换向器表面有效面积大，在大中型直流电机中被广泛应用。这种换向器的应用范围主要受到转速的限制（见图 1.4-27）。

换向片间单位压力 p 为

$$p=6+0.5\left(\frac{D_k}{100}\frac{n_{max}}{1000}\right)^{3/2}$$

式中，p 为换向片间单位压力，MPa；n_{max} 为换向器最高工作转速，r/min。

拉紧螺杆轴向拉力

$$P=0.18pA$$

式中，A 为换向片侧面面积，mm^2。

换向器填充系数

$$\theta=1-\frac{Kt_0}{\pi(D_0+h_0)}$$

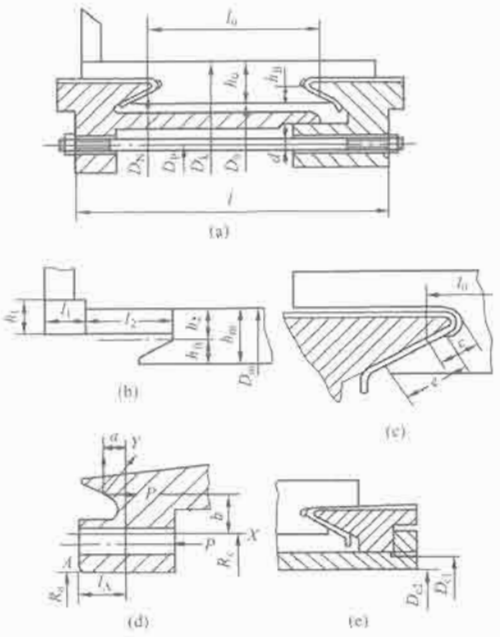


图 1.4-27 拱形换向器结构简图

式中，K 为换向片数；t_0 为片间云母厚度，mm。

换向器的超速离心力与静态径向力的比值

$$i=0.25\times10^{-4}(D_0+h_0)^2\frac{\theta}{P}\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2$$

热态（150℃）对常温（20℃）静态的修正系数

$$\xi=1.5+0.5i$$

拉紧螺杆应力

$$\sigma_g=\frac{P\xi}{mA_0}+\frac{D_p l^2 d}{44371A_0}\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \tag{1.4-50}$$

式中，m 为拉紧螺杆数；A_0 为每个螺杆截面积，mm^2。

换向片鸽尾根部弯曲应力

$$\sigma_w=3.56\frac{P\xi(C-0.18h_B)}{h_B^2\theta(D_0+h_B)} \tag{1.4-51}$$

换向片中部弯曲应力

$$\sigma_1=\frac{1.5PI_0^2\xi}{\theta h_m(D_m-h_m)} \tag{1.4-52}$$

式中，σ_1 为中部弯曲应力，MPa；l_0 为换向器计算长度，mm；h_m 为磨损后换向器高度，mm；D_m 为换向器最小磨损直径，mm。

磨损后换向器端部弯曲应力

$$\sigma_c=\frac{\sigma}{h_c^2}[(C_0+C_1)(0.5l_1+l_2)+0.5C_2l_2^2] \tag{1.4-53}$$

式中，σ_c 为端部弯曲应力，MPa；C_0 为分配在换向片单位厚度上的升高片在最大转速时的离心力，N/mm；C_1 为换向片端部 l_1 段单位厚度在最大转速时的离心力，N/mm；C_2 为换向片端部 l_2 段单位厚度在最大转速时的离心力，N/mm。

V 形绝缘垫圈压应力

$$\sigma_N=0.64\frac{P\xi}{D_N e} \tag{1.4-54}$$

换向器 A 点应力

$$\sigma_p=\frac{1.73P\xi R_c}{2\pi A_A R_a}+\frac{Pl_A R_c\xi(1.73a+b)}{2\pi I_{ay}R_a} \tag{1.4-55}$$

式中，A_A 为压圈截面积，mm^2；I_{ay} 为压圈截面惯性矩，mm^4。

套圈螺纹处拉应力

$$\sigma_m=\frac{4P\xi}{\pi(D_{c1}^2-D_{c2}^2)} \tag{1.4-56}$$

许用应力

$[\sigma_R]=180MPa$

$[\sigma_w]=160MPa$

$[\sigma_1]=180MPa$

$[\sigma_c]=120MPa$

$[\sigma_N]=70MPa$

$[\sigma_p]=200MPa$

$[\sigma_m]=180MPa$（G5 或优质碳素结构钢）

$[\sigma_m]=140MPa$（铸钢 ZG270-500）

(6) 离心式风扇的强度计算

离心式风扇主要计算风扇环的应力。当采用单排风叶时，两个风扇环的最大拉应力均为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$\sigma_i = \frac{(C_i + 0.5C_0)D_i}{2\pi A_i(D_i - B_i)}$$

式中，C_i 为第 i 个风扇环的离心力，N；C_0 为全部风叶的总离心力，N；D_i 为第 i 个风扇环的平均直径，mm；A_i 为第 i 个风扇环的截面积，mm；B_i 为第 i 个风扇环的径向宽度，mm。

当采用双排风叶时，外边两个风扇环的应力仍可参照上式计算。中间一个风扇环的应力稍有不同，需要将上式中的 $0.5C_0$ 一项换成两排风叶的离心力之和的一半。

(7) 转子绑扎计算

当转子线圈端部采用钢丝绑扎时，绑扎钢丝在超速时的拉应力可按下式计算

$$\sigma = \rho v^2 + \frac{C+F}{2\pi A} \tag{1.4-57}$$

式中，ρ 为钢丝材料的密度，kg/mm^3；v 为超速时钢丝的线速度，m/s；C 为超速时被绑扎件的离心力，N；F 为绑扎时的径向箍紧力，N；A 为各匝钢丝的总截面积，m^2。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第5章 电机绝缘

电机绝缘是电机最重要的组成部分之一。电机绝缘在电机中主要起隔离电动势的作用，使电流沿着规定方向流动。此外绝缘还有固定绕组的作用。

电机绝缘因其组成和作用特殊，其对电机的影响十分突出。

首先，电机绝缘是限制电机出力的主要因素。随着电机容量增大，势必要求电机电压升高或电流加大，进而要求绝缘能长时间承受更高电压的作用或长时间承受更高温度的作用，但是绝缘由于受其组成材料的限制，其电气强度和耐热性有限，因此常常限制了电机容量的增大。

其次，绝缘是电机中应力最集中而强度最脆弱的部件。绝缘是电机中唯一同时承受温度、电场、环境条件和机械应力的部件，而由于绝缘材料的不均匀性和绝缘工艺上的不完善又往往使绝缘存在缺陷，因此电机绝缘常常是决定电机运行可靠性和使用寿命的关键性因素。据统计，电机事故中因绝缘引起的事故约占60%。

绝缘又是电机中价值最昂贵的部分。不仅各种绝缘材料价格昂贵，而且绝缘制造工艺复杂、工艺时间长，对电机制造成本的影响明显。据统计，电机线圈的价值约占电机成本的30%。另外电机绝缘厚度和线圈尺寸对电机的技术经济指标有很大影响。例如，平均计算，电机绝缘厚度减薄15%～20%，同尺寸的电机功率可提高4%～10%。

1 电机绝缘的基本性能

电机绝缘在电机中担负着重要的功能，同时又承受着多种应力的作用，因此电机绝缘应具有一些基本性能，以保证电机能长期安全地运行。电机绝缘的基本性能主要有：优良的介电性能、足够的耐热性能、良好的力学性能和耐环境因素性能。

1.1 介电性能

介电性能是电机绝缘最重要的性能之一。介电性能包括绝缘电阻、极化指数、介质损耗因数、局部放电强度、介电强度、电晕起始电压等，其中最重要的介电性能是绝缘的介电强度。

(1) 绝缘电阻

绝缘电阻是绝缘抵抗直流电流的电气绝缘能力，是施加于绝缘的直流电压除以全部合成电流的商。通过测量绝缘电阻，可以反映绝缘结构和工艺有无缺陷，绝缘状态是否良好。

电机绕组的绝缘电阻与所用绝缘材料的种类、状态及其应用工艺有关。通常，绝缘电阻随绝缘厚度成正比变化，随导体表面积成反比变化。

当测量电机绕组的绝缘电阻时，在绕组的导体与接地的机座（铁心）之间施加上直流电压，在绕组绝缘上会出现四个不同的电流，即表面泄漏电流（I_L）、几何电容电流（I_C）、电导电流（I_G）、和吸收电流（I_A）。其中表面泄漏电流（I_L）主要由绕组表面潮湿或其他导电污染引起，它不随加压时间而变化；几何电容电流（I_C）是外电场作用于电介质时引起介质的极化所产生的电流。由于极化过程极为短暂，所以几何电容电流尽管一开始幅值较大，但很快便衰减为零。它通常不影响测量；电导电流（I_G）是由绝缘体内极少数束缚很弱的或自由的离子在电场作用下发生移动而产生的电流，这个电流基本是恒定的。在整体性较好的聚酯和环氧云母绝缘系统中，电导电流几乎为零，除非绝缘被潮气渗透；吸收电流（I_A）是由电介质中的偶极子在电场作用下沿电场方向转动产生的电流、电介质中的束缚离子随电场方向发生弹性位移而产生的电流以及因两种介质的介电常数和导电率不同而引起介质交界面上的电荷移动而产生的电流的综合。因上述三种极化过程较缓慢，故吸收电流的衰减较慢。在直流电压下，介质内的表面泄漏电流（I_L）、几何电容电流（I_C）、电导电流（I_G）和吸收电流（I_A）及总电流与时间 t 的关系如图1.5-1所示。

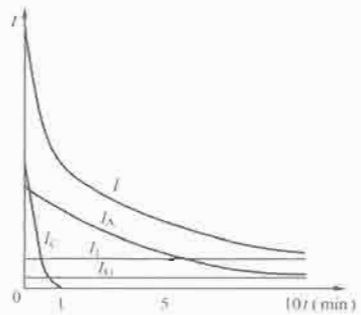


图1.5-1 直流电压下固体介质内所产生的各电流及总电流与时间的关系

由图1.5-1可见在直流电压下在绝缘中出现的总电流是一个随时间增大而衰减的电流，只有过了一定时间电流才趋于恒定。由上述电压和电流计算出来的绝缘电阻开始阶段也是一个变化的量，然后才逐渐恒定。因此测量绝缘电阻要分别记录不同时间的绝缘电阻值。通常标准规定的绝缘电阻值为施加电压1min时测量的值。

电机绕组的绝缘电阻与温度有密切关系。温度升高，绝缘电阻减小；反之，温度降低，绝缘电阻变大。这是因为温度升高提供了热能，使介质内额外的电荷载体获得释放并加速了内部分子和离子的运动。同时在绝缘中低温时与绝缘物结合在一起的水分，当温度上升时，水分即向电场两极伸长。在纤维物质中呈细长线状的水分粒子的伸长就增加了其导电性。此外，如果水分中含有溶解的杂质，或绝缘中含有的盐类或酸类物质被水分解，亦会增加其导电性。这种情况随着温度升高而加剧。故温度升高，绝缘电阻下降。

不同种类绝缘电阻随温度的变化规律会略有不同，但基本上都按指数规律变化。例如，我国过去推荐的电机绕组绝缘电阻温度换算公式为

$$R_t = R \times 2^{(75-t)/10} \qquad (1.5\text{-}1)$$

（适用热塑性绝缘）

$$R_t = R \times 1.6^{(100-t)/10} \qquad (1.5\text{-}2)$$

（适用B级热固性绝缘）

式中，R_t 为 t℃下绝缘电阻，MΩ；R 为绕组75℃时（热塑

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

绝缘）或 100℃时（B 级热固绝缘）的绝缘电阻，MΩ。

最近通过对 F 级环氧粉云母模压绝缘线圈及绕组的测试和计算，得出其绝缘电阻的温度换算公式为

$$R_t = R_T \times 1.6^{(T-t)/10} \qquad (1.5\text{-}3)$$

式中，R_t 为较低温度时，t℃的绝缘电阻，MΩ；R_T 为较高温度时（T℃）的绝缘电阻，MΩ。

式（1.5-1）表明，对热塑性绝缘（沥青云母类绝缘）的绕组，温度每升高 10℃，绝缘电阻减小一半；而温度每降低 10℃，绝缘电阻则翻番。公式（1.5-2）和式（1.5-3）表明，对 B 级和 F 级的环氧粉云母热固性绝缘的绕组来说，它们有相同的绝缘电阻温度特性，即温度每升高 10℃，绝缘电阻减小为 1.6 倍；反之温度每降低 10℃，绝缘电阻则增大为 1.6 倍。需要说明的是，上述绝缘电阻温度换算公式得出的值可能与实际测量值有一定误差，特别是测量露点以下绕组的绝缘电阻时，误差会更大。

关于电机绕组的绝缘电阻限值问题，在国家标准 GB 755—1987《旋转电机基本技术要求》中曾经这样规定：电机绕组的绝缘电阻在热状态时或温升试验后应不低于式（1.5-4）所求得的数值

$$R = \frac{U}{1000 + P/100} \qquad (1.5\text{-}4)$$

式中，R 为电机绕组的绝缘电阻，MΩ；U 为电机绕组的额定电压，V；P 为电机的额定功率，对交流电动机，kW；交流发电机，kVA；调相机，kvar。

但在 GB 755—2000《旋转电机定额和性能》中，取消了关于绝缘电阻的规定。其后于 2001 年由国家标准化管理委员会发布了《旋转电机绝缘电阻和极化指数的测量方法和限值》的国家标准的送审稿。该国家标准（送审稿）等同采用了美国 IEEE 43—2000 标准。标准中推荐的在 40℃时的最小绝缘电阻值见表 1.5-1。

表 1.5-1 推荐的在 40℃时的最小绝缘电阻值 单位：MΩ

最小绝缘电阻	试 品
$R = U + 1$	适用于大多数 1970 年以前制造的绕组，所有的磁场绕组以及下面未提及的其他绕组
$R = 100$	适用于大多数 1970 年以后制造的直流电枢和交流绕组（成型线圈）
$R = 5$	适用于大多数额定电压 1kV 以下的具有散下线定子线圈的电机和具有成型线圈的电机

注 表中 U 为电机额定电压，单位 kV。

需要注意的是，表 1.5-1 推荐的最小绝缘电阻值是指整个绕组在施加电压 1min 后的值。如果三相定子绕组在测试绝缘电阻时，仅测试其中一相，而另二相接地，则测试到的绝缘电阻最小值应近似为整个绕组的 2 倍。如果每相都分别测试并且不测试的其他二相使用保护电路，则测试到的最小绝缘电阻值应为整个绕组的 3 倍。

（2）极化指数

极化指数是在相同温度下在同一次测试时在规定的时间间隔测试到的两个绝缘电阻的比值。它常常与绝缘电阻一起用来判断电机绕组绝缘是否受潮或受污染。

极化指数（P.I）通常是指施加电压 10min 测到的绝缘电阻与施加电压 1min 测到的绝缘电阻的比值，即 $P.I = R_{10min}/R_{1min}$。有时根据需要也可采用其他时间间隔绝缘电阻的比值，例如 $P.I = R_{60s}/R_{30s}$ 或 $P.I = R_{60s}/R_{15s}$ 等。但是不同时间间隔的 P.I 值是不同的，需要区别判断。目前国内外普遍采用的极化指数为 $P.I = R_{10min}/R_{1min}$。推荐的所有电机部件的最小极化指数，除 A 级绝缘为 P.I = 1.5 外，其他 B 级、F 级和 H 级绝缘均为 P.I = 2.0。对于电机绕组 60s 绝缘电阻与 15s 绝缘电阻的比值，即 R_{60s}/R_{15s}，国内过去叫做吸收比，其实也是一种极化指数。其合格标准为：对沥青云母绝缘不小于 1.3，对环氧粉云母绝缘为不小于 1.6。

极化指数小于规定值，是绝缘中电导电流和表面泄漏电流较大所致，这常常表示绝缘有受潮和受污染的情况，应采取相应措施解决，如加热干燥绕组绝缘或清洁绕组绝缘表面等。表 1.5-2 列出在各种极化指数下适宜采取的措施，可供参考。

表 1.5-2 各种极化指数的比较

好坏程度	R_{60s}/R_{30s} 的极化指数 PI	R_{10min}/R_{1min} 的极化指数 PI	是否需要干燥处理
危险	—	<1	需要
差	≤1.1	1～1.5	需要
不可靠	1.1～1.25	1.5～2.0	推荐
安全	1.25～1.4	2.0～3.0	不需要
好	1.4～1.6	3.0～4.0	不需要
很好	>1.6	>4.0	不需要

注 极化指数应在干燥前后在同一温度下测定（当绕组需要干燥时）。

（3）介质损耗因数

介质在外施电压作用下，由于介质构造的不均匀而在介质构造的边界面上发生电荷的累积，导致电荷的重新分布迟缓一个时间。在交流电场的作用下，这些边界面上的电荷时而累积时而消失。电荷的这种累积和消失都要通过介质内部，这样就造成了介质的能量损耗。而在具有偶极子的介质中，偶极子会随着电场方向转向。在交变电场作用下，这些偶极子会交替改变位置，因而会在电介质的各部间产生摩擦，引起能量损耗。上述由于介质电导和介质极化所产生的能量损耗称为介质损耗。

当介质上施加一交流电压时，由于介质电导和介质极化的滞后效应，使通过介质的电流不是超前于电压 $\pi/2$，而是超前于电压 φ 角度，而 $\varphi = \pi/2 - \delta$，如图 1.5-2 所示。

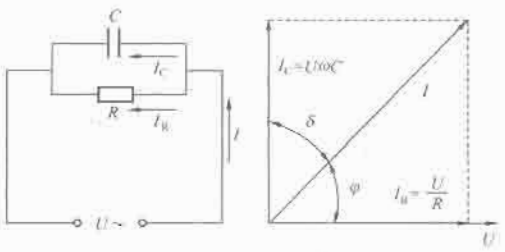


图 1.5-2 介质的等效电路图和矢量图

由图 1.5-2 可导出介质损耗因数

$$\tan\delta = \frac{UI_R}{UI_C} = \frac{UI\cos\varphi}{UI_C} \qquad (1.5\text{-}5)$$

由式（1.5-5）可看出，介损耗因数 $\tan\delta$ 是表示介质中损耗功率 $UI\cos\varphi$ 与无功功率 UI_C 之比。

介质损耗因数或称介质损耗角正切 $\tan\delta$ 是电机绝缘的一个重要性能。在低场强下的 $\tan\delta$ 值，常常可以反映绝缘材料和绝缘工艺是否完善，如一般电导大、极性强的材料损耗比较大，固化不完全的材料损耗大。在场强较高时，绝缘内有气隙会发生局部放电，$\tan\delta$ 会迅速增大。温度对 $\tan\delta$ 的影响很明显。通常，温度升高，$\tan\delta$ 增大。许多绝缘在一

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

定温度下还会出现 tanδ 的峰值，过了这个温度后，tanδ 还会降下来。

由不同电压下测得的 tanδ 值可以计算出介质损耗因数增量 Δtanδ。Δtanδ 能灵敏地反映绝缘结构中的局部缺陷。当绝缘整体性不良时，随着外施电压升高，绝缘中的气隙将产生局部放电，从而导致该电压下的 tanδ 增长很快，表示该电压下的 tanδ 值与未产生局部放电的较低电压下的 tanδ 值之差的 Δtanδ 值将变大。所以，Δtanδ 值大，常常表示绝缘内有气隙。有时还可以根据 Δtanδ 值计算出线圈绝缘的相对气隙含量。

线圈在室温下介质损耗因数 tanδ 及其增量 Δtanδ 限值的规定见表 1.5-3。关于热态下的介质损耗因数 tanδ，国外一般不作规定，国内也有争议。

表 1.5-3 室温下 tanδ 和 Δtanδ 的限值 单位：%

条 件	水轮发电机和汽轮发电机线圈	交流电机线圈（6kV）	交流电机线圈（6kV 以上）
$\tan\delta_{0.2U}$	3.0	3.0	3.0
$(\tan\delta_{0.8U}-\tan\delta_{0.2U})/2$	1.0	0.3	0.5
每 0.2U 间距 tanδ	1.2	0.6	0.8

除了测量定子线圈的介质损耗因数，近来有些电机厂也开始测试定子绕组的介质损耗因数。测试一般在定子浸漆固化后或装配完成后进行。测试时用绝缘板将定子与大地隔离开来，然后定子绕组引线接高压，机座或铁心作测量极进行测试。通常先测各单相，再测三相。

（4）局部放电强度

在电场作用下，绝缘的部分区域中发生放电短路现象称为局部放电。局部放电可以发生在绝缘结构内部气隙或导体的边缘上，但在电极之间不形成通道。

绝缘在制造过程中常包含一部分比固体绝缘介质容易击穿的气隙，因此当外加电压升高到一定值时会造成空气的局部击穿而产生绝缘局部放电。

绝缘的局部放电伴随着电、热和化学过程，这些过程常常使绝缘性能下降。因此，在许多情况下，绝缘的损坏常由绝缘内部或表面的局部放电引起。所以检测局部放电是否存在以及测量其放电的强度是极为重要的。

有关局部放电的参数有好几个，如放电起始电压与熄灭电压，实际放电量与视在放电量、放电能量、放电重复率、放电功率等。通常在电机上采用的局部放电参数是放电起始电压和最大（视在）放电量。所谓放电起始电压（C.S.V）是当施加于试样上的电压逐渐从看不见局部放电的较低电压上升时，在试验装置中观察到局部放电的最低电压。在实际测量中，放电起始电压是局部放电量等于或超过规定值（通常为 1×10^3 pC 或 1×10^4 pC）时的最低电压。放电过程中在介质内部移动的电荷称为实际放电量。因为实际放电量发生在介质内部，所以无法直接测量。而为了度量放电强度，于是引入视在放电量这个参数，由于局部放电会引起整个试样上的电压变化，而电压变化可以测量，因此视在放电量是可以测量的。虽然视在放电量可能比实际放电量小得多，它不能代表放电时产生的真实放电量，但可以认为是度量放电强度的一个合适参数。电机测量中，一般规定在电压为 $U_N/\sqrt{3}$ 时测量最大放电量 Q_{max}，也即最大视在放电量。

通过测量线圈或绕组的局部放电强度，可以较灵敏地发现线圈绝缘的整体性问题以及线圈与铁心槽之间的放电问题。这对于运行时间较长的电机有更重要的意义，因为通过比较绕组的最大放电量，可以帮助判断绝缘的老化情况。

目前，国内电机制造行业尚未全面推行定子绕组的局部放电检测试验，只是对一些重要电机或与国外合作生产电机进行局部放电检测。1990 年电力部门对环氧粉云母绝缘的发电机定子绕组绝缘的老化鉴定试验项目和标准（草案）中，绕组和单根线棒的最大局部放电量作为指标之一被列入，这表明局部放电测量的重要性正逐渐被认识。

（5）介电强度

单位绝缘厚度的击穿电压值称为介电强度。介电强度是电机绝缘最重要的性能之一，它对电机绝缘结构设计及对电机的安全可靠运行都有重要意义。

绝缘的介电强度与所施加电压的种类有关。在直流电压、冲击电压和工频交流电压中，工频交流电压对绝缘的作用最严酷，介电强度相对较低。电机绝缘中的介电强度通常是指工频交流电压下的介电强度。介电强度与击穿试验时施加高电压的时间长短也有关。通常国内采用瞬时工频击穿电压和瞬时工频介电强度。绝缘的介电强度还与试样的温度有一定关系。通常，高温下的介电强度低于常温下的介电强度。工程上常用的介电强度指的是常温下的介电强度，除非另有说明。

电机绝缘介电强度是实际表示绝缘结构承受电场作用的能力，是电机安全运行的基础。考虑到电机长期运行中绝缘会逐渐老化，为此电机新线圈的介电强度要留有一定的裕度。这个裕度又称储备系数，它由线圈的瞬时击穿电压除电机的额定电压（线电压）得到。电机绝缘的储备系数值的选取与电机额定电压和绝缘类型等有关。当额定电压较低时，绕组绝缘厚度也较小。而根据绝缘厚度与其击穿电压的关系规律：当绝缘厚度不是很薄时，介电强度将随厚度的增加而下降。因此一般低压电机的绝缘击穿电压储备系数较大，而高压电机的储备系数较小。另外储备系数还与绝缘的老化速率有关。老化速率大的绝缘，其储备系数应取较大值，反之亦然。而绝缘的老化速率与绝缘类型有关。新型少胶云母真空压力浸渍绝缘因云母含量高且不含气隙，长期耐电压性能优越，老化速率相对较小，其储备系数可取较小的值。国内高压电机定子绕组绝缘的击穿电压储备系数过去大多为 7，因为那时电机额定电压普遍较低，绝缘老化速率较快。但近来随着电机额定电压不断提高，新绝缘系统的应用以及主绝缘厚度的减薄，主绝缘长期耐电性能的提高，电机绝缘击穿电压储备系数已有逐渐降低的趋势。有的 20kV 水轮发电机定子线圈的储备系数已降为 5.5。国内高压电机定子绕组对地绝缘的介电强度最小值见表 1.5-4。

表 1.5-4 高压电机定子绕组对地绝缘最低介电强度

额定电压（kV）	介电强度（MV/m）
6.0～10.5	≥20
13.8～15.75	≥19
18.0～20.0	≥18

（6）电晕起始电压

电机线圈在铁心出槽口处由于电场比较集中，线圈表面的电压降随着向铁心靠近而递增。当这个电压降达到一定值时，该处就会发生电晕。电晕是一种不完全的气体放电。但当电压继续升高，则不完全放电可发展为完全放电，电晕变为火花放电或电弧放电。据计算，在线圈未作防晕处理时，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

相电压为 3.46kV 的线圈端部就会产生电晕。

另外，电机定子槽部也会产生电晕。这是由定子线圈表面与定子铁心槽壁之间的气隙放电产生的；铁心的通风槽口处因电场不均匀也可能产生电晕，其临界起晕场强为 8.1MV/m。据计算，额定电压为 6.3kV 的电机定子线圈槽部的法向场强和轴向场强都已处于临界起晕状态。

电晕的产生也会伴随电、热和化学过程，从而损伤绝缘，因此应防止电晕的产生。为了消除槽部电晕，通常是在定子线圈的槽部表面涂刷低电阻防电晕漆或包绕低电阻防电晕带，一方面使铁心通风槽口电场分布均匀化、消除轴向电位梯度；另一方面使线圈表面与铁心槽壁的接触面积扩大，接触电阻降低，从而减小其间的电位差，消除电晕。抑制线圈端部电晕的方法有两个。一个是在线圈端部出槽口处敷设半导电层，使线圈端部的电压降趋于均匀，并处在电晕起始电压以下；另一个方法是在线圈槽口处对地绝缘中设置内屏蔽来调整电场，使线圈端部电压分布变得均匀些。实践中也可以两个方法一起应用。

表示高压定子线圈和绕组防电晕效果的参数，主要有两个，即电晕起始电压和线圈的槽电位。单个定子线圈（线棒）的电晕起始电压要求不小于 $1.5U_N$，定子绕组的电晕起始电压要求不小于 $1.05U_N$。线圈的槽电位是反映线圈在铁心槽内接触状况的参数。当线圈表面与槽壁接触良好时，槽电位较小；而接触不良时，槽电位则较大。测量定子线圈槽电位时，在定子绕组上施加高电压，然后测量线圈表面上的电位值。通常要求在定子的相电压下，线圈表面槽电位不大于 10V。

1.2 耐热性能

电机在运行时，电机中的各种绕组都有电流流动，而由于绕组本身有电阻，因此绕组会发热。流过绕组的电流越大和绕组本身的电阻越大，绕组的发热就越厉害，而绕组上的绝缘承受的热应力也越大。所以，绕组绝缘应具有与电机相匹配的耐热性。

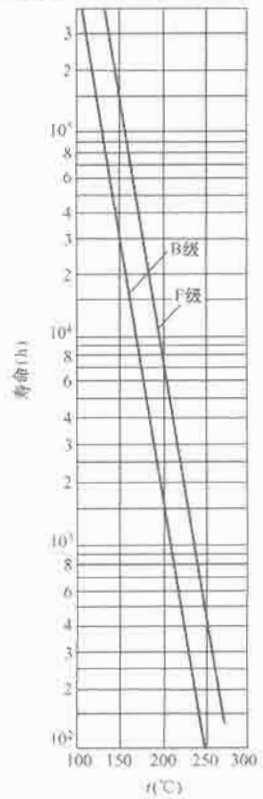


图 1.5-3 电机绝缘寿命与温度的关系

温度对绝缘的性能和寿命有很大影响。在高温下许多绝缘的电气性能和力学性能都有所下降。温度更是对绝缘老化起支配作用的因素。电机绝缘的寿命随温度升高而呈指数规律下降，见图 1.5-3 和式（1.5-6）

$$\lg\tau = a + \frac{b}{T} \quad (1.5\text{-}6)$$

式中，τ 为绝缘的寿命；a、b 为常数；T 为绝对温度。式（1.5-6）表明，绝缘的寿命 τ 的对数与热力学温度 T 的倒数有线性关系。

因为电机绝缘需要长期在较高的工作温度下工作，所以在设计电机绝缘结构时，对组成绝缘的各种绝缘材料的耐热性必须认真考虑。绝缘的耐热性通常用耐热等级来分类。耐热等级由材料在电机电器运行中允许的最高长期工作温度决定。属于某一类耐热等级的电机电器，不仅在该等级温度下短时间内绝缘不会有显著的性能改变，而且在该温度下长期运行时绝缘也不会产生不该有的变化，并能承受正常运行的温度变化。

我国根据国际电工委员会 IEC85 标准提出的国家标准 GB 11021—1989《电气绝缘的耐热性能评定和分级》中，关于各耐热等级与所对应的温度值见表 1.5-5。

表 1.5-5 绝缘耐热等级与所对应温度

耐热等级	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
温度（℃）	90	105	120	130	155	180	200	220	250

注 温度超过 250℃，则按每增加 25℃的间隔相应设置耐热等级。

判断绝缘属于哪一个耐热等级可以用所用绝缘材料的耐热性试验包括热老化试验以及根据采用该材料的电机电器的运行经验决定。

一台电机的许多绝缘部分往往不是都在最高设计温度下运行，所以各种不同耐热等级的绝缘材料可以结合起来用在同一台电机上。这样的电机常常同样能获得满意的运行质量。但是这种绝缘结构或绝缘系统的耐热性应进行结构的模拟试验（机械行业标准 JB/T 7589—1994《高压电机绝缘结构耐热性能评定方法》）来综合评定。

1.3 力学性能

电机绕组绝缘在制造和运行过程中，常会受到机械应力、电磁力和热应力等的作用。例如线圈在搬运、下线时会受到弯曲、敲打和扭力；绕组在运行时会受到双倍工频的振动；电机遭遇突然短路时，定子绕组槽部和端部都会受到强大的电磁力的作用。据计算 600MW 汽轮发电机定子单相突然短路时，下层线棒压向槽底的力可达 10000N/cm，绕组端部受到的切向力可达 2000N/cm，径向力也差不多。电机在长期的起机停机过程中，定子绕组导体和绝缘因热胀冷缩率不同会使绝缘受到拉伸和压缩作用。因此电机绕组绝缘应该具有良好的力学性能，以承受其受到的各种应力，保持绝缘的基本性能。

电机绕组绝缘上受到的各种应力，综合起来，可以用弯曲应力、疲劳应力和冲击应力来描述。

国内对高压电机用环氧粉云母绝缘的弯曲强度和冲击强度都有要求，其中 F 级桐马环氧粉云母绝缘板材在 155℃下的弯曲强度要求不小于 60MPa，室温下的冲击强度要求不小于 80kJ/m²。

据文献介绍，粉云母绝缘击穿电压随弯曲应力增加至某个临界范围而迅速下降，破坏是由拉伸侧的绝缘断裂引起的。在弯曲应力小于临界应力范围时，绝缘几乎可以维持原始介电水平。线圈在装配或返修时可以遇到的最大弯曲应力为 40MPa。国内曾对 5 种不同绝缘型号的环氧粉云母绝缘线棒进行机械性能评定试验，其试验线棒为截面 13mm×51mm 铝棒外面包绕绝缘，绝缘单面厚度为 3.5mm。

弯曲时，线棒置于跨距为 450mm 的两个支点上，线棒导体加电压 22.5kV，线棒表面包铝箔并接地，中心压头（ϕ30mm 圆头）加压力至线棒绝缘击穿。结果 5 种试样在发生击穿时的最小应力值为 53.2MPa，经过 180℃5 周期（3840h）的热老化后，最小破坏应力值仍有 43.9MPa，大于线棒实际可能遇到的最大弯曲应力。试验结果说明，5 种型号绝缘均具有足够弯曲强度。而弯曲疲劳试验结果也表明，多数环氧粉云母绝缘都有较好的耐弯曲疲劳性能，绝缘线棒试样经 180℃5 周期（3840h）热老化后，其耐反复弯曲的次数仍达到 1×10^5 以上，能满足运行疲劳要求。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

1.4 耐环境因素性能

由于电机在实际中的应用范围十分广泛，应用场所五花八门，因此电机绝缘在应用中遇到的环境因素多种多样。而电机因其气候防护类型不同，电机绝缘接触各种环境因素的情况也很不同。例如，在矿山和水泥厂运行的电机，周围粉尘大；在化工厂工作的电机环境中，腐蚀性气体浓度高；在湿热地区运行的电机，环境湿度大，温度高；在核能处运行的电机辐照强度高；在利用氟利昂致冷中工作的电机，周围氟含量高。上述这些环境因素对绝缘性能都会产生影响：粉尘附着在绕组表面会使绝缘电阻下降，泄漏电流增大，电气强度降低；而γ射线和中子辐照会使绝缘加速裂解，导致绝缘性能下降甚至丧失。氟利昂R12能溶解多种有机物质，有的绝缘材料在氟利昂中会很快丧失其性能。

针对各种环境因素对绝缘的影响，在进行电机绝缘结构设计时，要慎重选择绝缘材料。有些特殊场所（如有γ射线、中子射线辐照场所）用的绝缘材料需预先通过有关试验（如射线辐照试验，防潮防霉试验、耐氟利昂试验等）。电机的绝缘结构件或电机样机有时也要进行有关试验。为了规范电机的使用环境条件以及试验方法，我国在原来相关标准的基础上制定了国家标准GB 12351—1990《热带型旋转电机环境技术要求》和机械行业标准JB/T 7576—1994《户内外防腐蚀旋转电机环境技术要求》。

2 同步电机绝缘

同步电机包括水轮发电机、汽轮发电机以及同步电动机和同步调相机等，大都属于大型重要设备。同步电机绝缘是电机绝缘中最重要的组成部分，绝缘要求高，技术难度大，往往代表着绝缘技术的最高水平和最新成果。

同步电机绝缘可分为定子绕组绝缘和转子绕组绝缘两大部分。

2.1 定子绕组绝缘结构

同步电机定子绕组绝缘的主要特点是承受的电压高，对绝缘的介电性能和防电晕性能要求高。

2.1.1 罗贝尔导线结构

大型同步电机的定子绕组大多由线棒组成，而线棒由多股并联的绝缘股线组成。由于大型交流电机的电负荷大，线棒股线间的循环电流损耗大。为了降低这种损耗，需对股线进行编织换位以消除各股线间的电位差和循环电流。这种股线间编织换位的导线通常叫罗贝尔导线（见图1.5-4）。罗贝尔导线中的股线绝缘要求绝缘厚度小，柔韧性和耐热性好。过去股线大多采用双玻璃丝包线或漆包加玻璃丝包线，现逐渐被双涤纶玻璃丝包烧结线和漆包涤纶玻璃丝包烧结线代替。其中双涤纶玻璃丝包烧结线的双面绝缘厚度为0.2mm，仅为传统双玻璃丝包线绝缘厚度的一半，而且能耐受较高的温度，与铜导体有良好的附着性。在205℃下热处理5h后进行弯曲，绝缘不开裂，有利于减少股线因压弯换位而产生的股间短路现象。

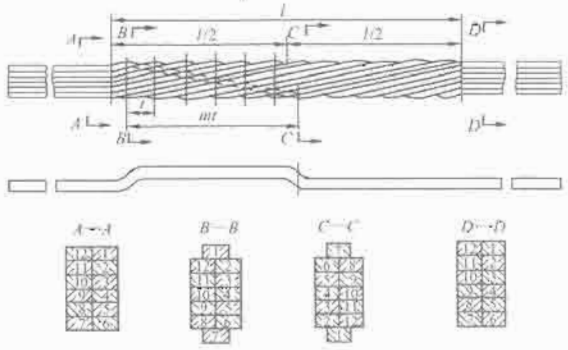


图1.5-4 罗贝尔导线360°换位示意图（$m=6$）

罗贝尔导线在股线换位编织后，在股线换位处要垫换位绝缘，以防止此处股线间短路。在罗贝尔导线的两排股线间还要垫排间绝缘。排间绝缘的作用有两个：一是防止两排间的股线之间短路；二是提供各股线之间黏结用黏合胶。换位绝缘和排间绝缘应该有较好的耐电晕性能，以耐可能存在于导线与主绝缘间的电晕的腐蚀。换位绝缘还要有良好耐剪切性能和抗压强度。通常，换位绝缘使用含片云母的柔软板材，排间绝缘则由富含未胶化黏合胶的粉云母板材料构成。

罗贝尔导线的股线绝缘和换位绝缘以及排间绝缘的厚度对定子槽的利用率有很大影响。国内近几年对罗贝尔导线的绝缘结构进行了优化。极大地减薄了有关绝缘的厚度，并取消了股线间的松胀量，使罗贝尔导线的绝缘截面占有率降低了约38%，从而使定子槽的利用率提高了3%～5%。

2.1.2 主绝缘结构

高压电机定子绕组主绝缘又称对地绝缘，是电机定子绕组承受主要电压的绝缘，也是最重要的绝缘。定子绕组主绝缘的性能对电机运行安全性和寿命有重要影响。

定子绕组主绝缘可以根据定子线圈槽部和端部是否采用同一绝缘结构分为复合式和连续式两种。所谓复合式结构是指线圈槽部和端部采用不同绝缘材料和结构的一种线圈绝缘型式。复合式绝缘的典型代表是套筒式绝缘，这种线圈的槽部绝缘通常由整张绝缘箔卷包而成，而线圈端部用绝缘带叠绕，两种绝缘在线圈直线端头处搭接。因搭接处的绝缘强度相对较差，因此线圈直线部分的长度随电机的额定电压升高而增大。目前高压条式线棒已很少采用复合式绝缘，但在6kV以下电压交流电机的圈式线圈中仍有一些采用复合式绝缘。连续式绝缘是整个线圈上均用绝缘带连续叠绕而成的线圈绝缘型式。

连续式绝缘因没有绝缘接缝等弱点，绝缘强度的均匀性较好，因此在高压电机中得到普遍应用，而且随着绝缘材料和绝缘技术的进步在不断地发展。20世纪五六十年代，高压电机定子绕组绝缘以沥青云母带连续式绝缘为主。20世纪60年代中期，环氧粉云母带连续式绝缘开始在电机上应用。到70年代，环氧粉云母绝缘已逐渐代替了沥青云母绝缘。以后，环氧粉云母绝缘又由B级发展到F级，由多胶云母模压（或液压）系统发展到少胶云母浸渍（VPI）系统。所谓多胶云母模压（或液压）系统是用多胶环氧粉云母带包绕线圈，然后用模压方法（或用液压方法）使线圈绝缘固化成型，再将线圈嵌入定子槽中组成绕组。而少胶云母浸渍（VPI）系统可分为线圈少胶云母浸渍（VPI）系统和绕组少胶云母浸渍（VPI）系统。所谓线圈少胶云母浸渍（VPI）系统是用少胶云母带包绕线圈（线棒）后，对线圈（线棒）进行真空压力浸渍无溶剂树脂（VPI），并使线圈（线棒）绝缘固化成型，然后再将成品线圈（线棒）嵌入定子铁心槽中；而绕组少胶云母浸渍（VPI）系统通常又称整浸绝缘系统，它是以少胶云母带包绕线圈（线棒）后，先将未固化成型的线圈（线棒）嵌入定子铁心槽中组成绕组，然后再将绕组连同铁心一起进行真空压力浸渍无溶剂树脂（VPI），并使绕组绝缘固化成型。多胶云母模压（或液压）系统和少胶云母浸渍（VPI）系统都能获得高质量的电机绝缘，因此这两种绝缘系统目

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

前在世界上都在使用。

高压电机定子绕组主绝缘结构设计要考虑多种因素，其中主要的因素有导线角部场强、主绝缘厚度以及使用的主绝缘材料、绝缘工艺等。

(1) 导线角部场强对主绝缘的影响

电机运行时，带有高电压的定子线圈导体对接地的定子铁心槽壁形成一个电场，由于线圈导体的截面是矩形的，因此在线圈导体的角部存在电场集中现象，也就是说，线圈导体角部的电场强度要比导体其他部位高得多。导体角部最大电场强度 E_{max} 与导体平面处平均电场强度 E_{av} 的关系见图 1.5-5 和式 (1.5-7)

$$E_{max}/E_{av} = (1.8r_2/r_1)^{\frac{1}{3}} \qquad (1.5\text{-}7)$$

式中，r_2 为线圈主绝缘外层圆角半径；r_1 为线圈导体圆角半径。

从图 1.5-5 和式 (1.5-7) 可见，电场不均匀系数 (或称集中系数) E_{max}/E_{av} 不仅与导体角部圆角半径有关，而且与线圈绝缘厚度有关。当导体圆角半径 (r_1) 增大，绝缘厚度减薄 (r_2 变小) 时，电场不均匀系数变小，反之亦然。

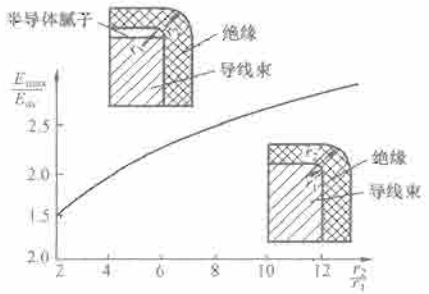


图 1.5-5 导线束角部最大场强与内外圆角半径比的关系

线圈导体角部的电场集中现象常常导致线圈主绝缘在此击穿，造成整个线圈绝缘介电强度降低。为了提高线圈绝缘的介电性能，有必要改善导体角部的电场集中现象。

从理论上讲，增大导体圆角半径 r_1 可有效降低电场不均匀系数，改善电场分布，从而提高线圈绝缘介电强度。例如，在线圈主绝缘厚度 (单面) d 为 3.5mm 情况下，当导体圆角半径 r_1 为 0.8mm 时，电场不均匀系数为 2.13；而当导体圆角半径 r_1 增大为 2.0mm 时，则电场不均匀系数降为 1.70。

实践中增大线圈导体圆角半径的措施大多是在导体 (罗贝尔导线) 的圆角处铺设一层半导电媒质，并使导体与半导电媒质在电气上相连，然后将角部半导电媒质修成较大的需要的圆角。但要注意圆角大小要适当，圆角过大会影响槽利用率。

(2) 主绝缘厚度的确定

高压电机定子绕组主绝缘厚度是电机绝缘重要指标，对电机的性能、寿命和技术经济指标有重大影响。主绝缘厚度的大小往往代表着该绝缘系统水平的高低，甚至代表着整个绝缘技术水平的高低。

选择主绝缘厚度主要应考虑以下三个方面，即主绝缘的击穿电压储备系数应达到一定值；主绝缘的工作场强 E_w ($E_w = U_N/\sqrt{3}d$) 下绝缘内部不发生局部放电或局部放电量低于允许值 (5×10^3 pC)；主绝缘经 30 年运行后的剩余击穿电压不低于电机预防性试验电压。

影响主绝缘厚度选择的因素很多，如绝缘材料种类和质量、绝缘成型类型、线圈制造和绝缘处理工艺、线圈嵌线工艺……可以说电机主绝缘制造所经历的十几道工序之中的每一道工序都可能对主绝缘制造质量造成影响，从而影响对主绝缘厚度的选择。选择合适的主绝缘厚度就是要在绝缘厚度最小的情况下保证有足够的介电强度和机械强度，并且在线圈制造和嵌线过程中以及在电机运行时安全可靠。

随着绝缘材料和绝缘技术的进步，国内高压电机定子绕组主绝缘厚度也有了很大的降低，尤其是采用少胶云母浸渍 (VPI) 绝缘系统的定子绕组主绝缘厚度减薄更明显，有的已达到国外先进水平。表 1.5-6 列出我国与国外先进电机公司大型发电机定子绕组主绝缘厚度。

表 1.5-6 大型发电机定子绕组主绝缘厚度 单位：mm

额定电压 (kV)	法国 A-A	加拿大 CGE	德国 Siemens	瑞士 ABB	中国 HEC
13.8	2.8	—	—	—	3.5
15.75	3.6	—	3.85	—	4.0
18.0	4.2	—	—	—	4.6
20.0	4.4	4.4	4.4	4.6	4.6

(3) 主绝缘材料

高压电机定子绕组主绝缘要承受电、热和机械等应力长期作用，这就对主绝缘材料提出许多严格的要求。

首先，主绝缘上承受的电压应力很大，额定工作场强一般在 (2～3) MV/m 之间，在受到雷电波或操作过电压侵袭时，电压应力可上升 3～4 倍。国际电工委员会 (IEC) 在 1990 年和 1995 年先后以 IEC 34-15 第一版和第二版的形式颁布了《交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平》的标准。标准提出电机绕组主绝缘应具有承受 $(4U_N+5)$kV 冲击电压峰值的能力。同时，高压电机定子绕组主绝缘在工作电压下和在过电压下都可能存在局部放电。这就要求主绝缘材料既要有很高的介电强度，又要有很好的耐电晕性能。而在这两方面性能特别优良的绝缘材料首推云母。云母是一种天然矿物，是一种含有多种微量元素的铝的硅酸盐合成物。云母的介电强度很高、损耗因数很小，表面及体积电阻很大，同时具有很好的剪切强度和拉伸强度，它还耐酸、碱、油及溶剂作用，耐热性极高，能抵抗放电产生的氧化作用，是一种非常理想的绝缘材料。但能做主绝缘材料的优质的天然白云母片资源少，满足不了需要，于是后来研制出了粉云母纸。粉云母纸分熟粉云母纸和生粉云母纸两种。所谓熟粉云母纸是将天然云母放在高温下煅烧，使云母变成小而薄的鳞片，然后采用酸法制浆工艺制成粉云母纸。熟粉云母纸均匀性好，电性能优良特别是介电强度高，吸胶能力大，但机械强度较差，适宜制造双面补强的多胶型粉云母带。生粉云母纸则是利用高压水的冲击力来喷射剥离天然云母，使云母粉碎成大而薄的鳞片，然后以此为纸浆抄纸而成。此纸由许多云母鳞片叠聚而成，所以又称鳞片粉云母纸或大鳞片粉云母纸。大鳞片粉云母纸由于其各鳞片的表面积大，有较大的交叠面积，使它具有优越的抗切通性能。另外大鳞片粉云母纸由于保持了天然云母的化学结晶结构，因此耐电晕性好。它还具有透气度高，渗透时间短等特点，所以很适宜作少胶粉云母带的基材。

目前，在高压电机定子绕组主绝缘中大量使用着各种粉云母带，片云母带已很少使用。在多胶云母模压 (或液压) 绝缘系统中使用的多胶粉云母带用的是熟粉云母纸。这种绝缘击穿电压高，但绝缘中的云母含量较低 (小于 50%)。在少胶云母浸渍 (VPI) 绝缘系统中使用的少胶云母带用的是

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

大鳞片粉云母纸。该绝缘云母含量高（60%以上），长期耐电性能优良。但不管多胶云母模压（或液压）绝缘还是少胶云母浸渍（VPI）绝缘都能获得良好的运行结果，它们的长期电热老化试验结果全都符合有关标准。表 1.5-7 和图 1.5-6 分别列出三峡电站 20kV 700MW 水轮发电机定子线棒试样在瑞士按原 ABB 公司（现为 Alstom 公司）试验方法和标准进行试验的结果。

高压电机定子绕组主绝缘中，黏合剂起着重要的作用。绝缘黏合剂主要是指云母带中的黏合剂（对多胶云母模压绝缘）和（或）浸渍树脂［对少胶云母浸渍（VPI）绝缘］。黏合剂使绝缘成为一个整体，决定着绝缘的耐热性，可以说绝缘的耐热性能和力学性能主要是由黏合剂决定的。

表 1.5-7 三峡定子线棒（U_N=20kV）耐电老化试验结果

线棒号	试验电压倍数 U/U_N	试验电压（kV）	电老化寿命（h）	电老化寿命标准（h）
1	2	40	1983	≥500
2			2362	
3			1754	
4			2062	
5	1.6	32	>7889（未寿终）	≥4000
6			>7889（未寿终）	

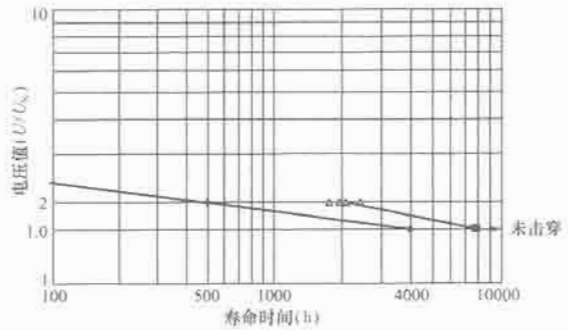


图 1.5-6 三峡定子线棒的电老化曲线

—◆— 一最低要求；—■— 一几何平均值；△一测量数值

20 世纪 80 年代以前，我国的环氧粉云母绝缘主要是 B 级绝缘，80 年代以后，F 级多胶云母模压绝缘开始在我国大型发电机上应用，并于 90 年代迅速在各种电机上推广应用，成为电机绝缘的主要品种。F 级浸渍型（VPI）绝缘系统也由 20 世纪 80 年代起在国内得到应用，但当时所用云母带不是少胶型的。

F 级绝缘系统不仅使绝缘耐热等级由 B 级基础上提高 1 级，而且使绝缘的机电性能等也有了提高。具体性能见表 1.5-8 和图 1.5-7。

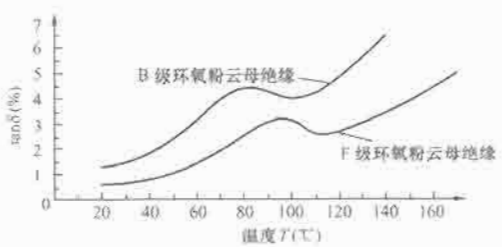


图 1.5-7 B 级、F 级定子线圈 tanδ-T 曲线

表 1.5-8 B、F 级环氧玻璃粉云母绝缘性能

序号	性 能	单 位	B 级 TOA 粉云母	F 级铜马粉云母
1	抗弯强度（常态/热态）	MPa	217.4/42（130℃）	261.5/64（155℃）
2	抗冲强度	kJ/m²	106.9	82
3	介电强度（板材）	MV/m	80	87
4	温度指数	—	148.2	163
5	介电强度（线棒）	MV/m	28	31
6	快速电老化寿命（35kV/3.5mm 线棒）	h	600	>743
7	热导率	W/(k·m)	0.27～0.29	0.30～0.31

2.1.3 防电晕结构

防电晕是高压电机定子绕组绝缘必须解决的一个问题，因为如果高压定子线圈不作防电晕处理或处理不好，则线圈制造时的多次耐电压试验可能无法进行；另外定子绕组在运行时会处于严重的电晕状态下，甚至处于火花放电状态下，极大地影响电机的安全运行。

在国内环氧粉云母绝缘应用初期，由于当时采用的防电晕材料附着性差、电阻值不稳定，加上对环氧粉云母绝缘防电晕的特殊性认识不足，结果导致多台早期使用环氧粉云母绝缘的发电机定子绝缘发生不同程度的电晕和电腐蚀问题，使电机不得不进行修理。

定子绕组的防电晕可以分为两部分，即槽部防晕和端部防晕。所谓槽部防晕系指定子线圈（线棒）嵌入铁心槽内部分的防晕，目的是在电机运行过程中使槽内线圈表面不产生电晕，不对定子铁心放电，并且不过热。槽部防晕包含三部分内容：线圈（线棒）槽部敷设一层低电阻防电晕层；定子槽部垫条及槽壁塞紧垫片采用半导电垫条；定子铁心槽壁表面喷涂半导电防电晕漆，或同时采用半导电防电晕漆布作槽衬。对槽部防晕结构和材料的要求主要有如下几点：① 防电晕层应具有合适而稳定的电阻值。电阻值过大会使防晕层表面电位及电位梯度升高，从而产生槽部电晕或火花放电；电阻值过小又会使防晕层表面电流变大或使铁心短路，从而导致线圈表面和铁心局部过热，危及线圈绝缘和铁心绝缘。一般线圈（线棒）槽部防电晕层的电阻率在(5×10^2～5×10^4)Ω 范围内。② 防电晕层应与线圈主绝缘相容，彼此性能参数互不影响。③ 防电晕层能与主绝缘黏结良好，具有好的整体性。④ 防电晕层的电阻值对温度不敏感。⑤ 防电晕层的厚度尽可能小，不易磨损。

20 世纪 70 年代国内开发成功的高压电机多胶云母模压绝缘定子线圈“一次成型”防电晕结构很好地满足了上述要求，是目前应用很广的一种防电晕结构。所谓“一次成型”防电晕结构是在定子线圈（线棒）包扎完主绝缘云母带后，在线圈的槽部规定部位包绕 1 层全固化低电阻防电晕带，在线圈端部的规定部位包绕 1 层全固化高电阻防电晕带以及相应的附加绝缘等，然后进行线圈（线棒）热模压，在线圈绝缘固化成型的同时，线圈防电晕层也一起与主绝缘黏结成整体。此外，为了增加线圈（线棒）与铁心槽的接触面积，降低线圈的槽电位，一些大型高压电机定子线圈嵌线时在线圈表面加一层半导电槽衬，这种半导电槽衬可以是具有半导电特性的纤维纸或玻璃布，也可以是其他具有一定弹性的半导

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

电材料。在线圈槽部表面涂一层硅橡胶/半导电硅橡胶并使之固化然后嵌入铁心槽中的防槽电晕结构（又称 RTV/CRTV 结构），因硅橡胶具有较好的弹性，能使线圈与铁心槽始终保持较好的“面”接触，既可有效降低线圈的槽电位，又可加强线圈的机械固定，改善热传导。

端部防晕是指定子绕组端部的防晕，其目的是使定子线圈端部电场分布均匀，使线圈在 1.5 倍额定电压下不产生电晕，在线圈和绕组耐电压试验时不放电、线圈表面不过热。在运行时，定子绕组端部相间无电晕。端部防晕也包含三部分内容：线圈（线棒）端部（出槽口外）表面按规定的不同部位敷设不同电阻值的高电阻防电晕层或在槽口附近主绝缘内埋设分阶的半导电材料（内屏）；高电阻防晕层外敷设附加绝缘和覆盖漆层；防止耐电压试验时放电和过热的其他措施，如设置并联分流器，减小流经防晕层的电流，充入 SF_6 气体等。

在线圈端部敷设高电阻防电晕层一般采用多级防晕结构，即靠近铁心处为低电阻层（为槽部防晕层的延伸）。然后依次为中电阻层、高电阻层。各层之间相互搭接约 20mm 左右。图 1.5-8 为定子线圈端部防晕结构示意图。高电阻防电晕层的分级数与电机的额定电压有关。电压低、级数少；电压高，级数多。但目前一般只用 2 级或 3 级。高电阻防电晕层中中电阻层和高电阻层的长度及它们之间的搭接长度、电阻值等可用计算机优化程序来确定，也可通过试验来确定。高电阻防电晕层最终要达到的目标是：① 各级防电晕层起始端处的电位梯度，在耐电压试验时应不超过 8.1kV/cm。② 各级电晕层起始端处表面单位损耗在同一数量级内，且不超过 0.6W/cm²。③ 最后一级防电晕层的末端对线圈导体的电压在规定的指标内。④ 在 $1.5U_N$ 下，高电阻防电晕层上的最高电位梯度不超过 2.1kV/cm。

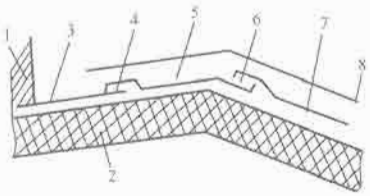


图 1.5-8 定子线圈端部防晕结构示意图
1—定子铁心；2—定子线圈；3—低阻层；4—中低阻搭接层；5—中阻层；6—中高阻搭接层；7—高阻层；8—附加绝缘及覆盖漆

线圈端部高电阻防电晕层的电阻值最好是非线性的，即其上的电压高时，电阻变小；电压低时电阻则变大，而掺有碳化硅（SiC）微粉的高电阻防电晕漆及漆布就具有这种非线性。因此现在大多数的高压定子线圈端部防电晕材料中都含有碳化硅。另外绕组端部防电晕层已逐渐延伸至整个绕组端部，包括斜边垫块和端箍等。

目前国内高压电机定子线圈防电晕结构已可以做到起晕电压 55kV 以上，瞬时闪络电压达 115kV，并且完成了 27kV 级定子线圈的防电晕结构的研究工作。

2.1.4 定子绕组连接件绝缘及放电间距

高压电机定子绕组为实现连线和固定，需要多种连接件和固定件，如连接线、并联环、引出线、端部支架、端箍等。这些连接件和固定件都须绝缘，这些绝缘也是定子绕组绝缘的组成部分。

连接线和并联环在电气上直接与定子线圈相连，用绝缘支架固定、没有直接接地之处，在绝缘强度上要求没有定子线圈那么高。但因连接线和并联环的绝缘工艺难度较大，绝缘质量相对较差，加上不受空间限制，故连接线和并联环的绝缘厚度往往不比定子线圈的绝缘厚度小，有时甚至还厚一些。组合式的连接线和并联环一般采用多胶云母带包绕，然后包绕热收缩带并进炉烘焙固化。也可采用边包绕云母带边涂刷室温固化环氧胶，然后用夹板或压板夹紧固化，使宽边绝缘平整。整浸型电机的定子连接线和并联环则可以同定子绕组一起包好绝缘后进行 VPI 处理。

引出线可分为两种：一种是采用电缆作引出线，适用于容量较小的电机；另一种是采用铜排作引出线，适用于大容量电机。在铜排作引出线的结构中，铜排绝缘有用高压瓷套管的，也有用包绕云母带或其他绝缘材料作绝缘的。高压大容量汽轮发电机大都用高压瓷套管作引出线绝缘。近年来国外汽轮发电机也有采用玻璃钢材料制造的高压套管的。水轮发电机的引线大多采用云母带绕包或云母箔卷包作绝缘，外面包绕热收缩带并烘焙固化。引出线的固定夹板也大多由绝缘层压板加工而成。在带绝缘的引出线与固定夹板之间，可垫一层预浸过室温固化环氧胶的涤纶毡或卷包一二层 Nomex 纸，既有利于引出线的固定，还可防止引出线绝缘磨损。引出线绝缘的厚度通常大于定子线圈对地绝缘厚度。

并头绝缘是指条式线棒在嵌入定子槽中后，线棒之间并头（相连）处的绝缘。并头位于远离铁心的绕组端部，正常情况下并头绝缘承受的电场强度不高。但处于高电位的并头和相间并头以及有水接头的并头，如果绝缘不好或电机内湿度大，有污染，则可能发生放电、爬电等绝缘事故，所以并头绝缘对电机的安全运行也是至关重要的。汽轮发电机定子绕组并头多采用云母带绕包绝缘，绕包时同时涂刷环氧胶，使绝缘层密实。同时要处理好与线棒绝缘搭接，绝缘搭接面要清理干净，搭接长度要足够。

水轮发电机定子线圈的并头大多采用环氧（或聚酯酚醛）玻璃纤维压制的塑料盒作绝缘，盒内用环氧灌注胶填充。有的水轮发电机并头盒采用上下开口式结构，且不用灌注胶填充，并头盒内与并头导体接触部位要作防电晕处理。

端箍是定子绕组端部重要部件，端箍一般位于定子绕组端部外圆，是个圆环状物件。端箍有两类：一类是用非磁性钢制成，外面包绝缘；一类是用聚酯（或环氧）无纬玻璃丝带绕制而成，固化后成玻璃钢端箍，不需另包绝缘。通常水轮发电机采用非磁性钢端箍，端箍绝缘方式同并联环绝缘相似。汽轮发电机则大多采用玻璃钢端箍。同步电动机两种端箍都有使用。还有一种软端箍最近开始在水轮发电机上使用。它是一种圆形玻璃丝套管，下线时绕在绕组端部外圈。由于下线时玻璃丝套管处于柔软状态，能与线圈大面积接触。下线完后往玻璃丝套管内注入环氧胶，环氧胶固化后就使玻璃丝套管变成玻璃钢端箍。

定子绕组端部固定支架是用来固定端箍或并联环的，支架通常用环氧玻璃层压板制成，也有用金属制成的。用金属制成的支架要适当加以绝缘。

条式线圈定子绕组端部绝缘间距见图 1.5-9 和表 1.5-9。圈式线圈定子绕组端部绝缘间距见图 1.5-19 和表 1.5-15。

A、B、C、D、E 意义见表 1.5-9。

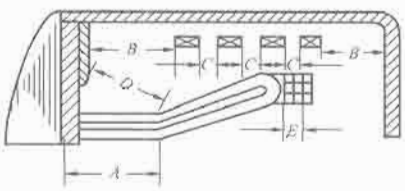


图 1.5-9 条式线圈定子绕组端部绝缘间距

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.5-9 条式线圈定子绕组端部绝缘间距 单位：mm

额定电压 U_N (kV)	端部角部对铁心 A	铜排对地 B	铜排间 C	端部角部对齿压板	极间引线高出尺寸 E
6～6.3	50	50	40	30	40
10～10.5	70	70	45	45	45
13.8	90	90	50	50	50
15.75	120	100	60	60	60
18	130	110	65	65	65
20	160	130	75	75	75

2.1.5 硅钢片绝缘

同步电机定子铁心是由薄的硅钢片（厚度一般为0.5mm）冲片叠装而成的。为了减少因感应电动势产生的涡流发热，要求硅钢片冲片上应有绝缘。对大型电机来说，定子铁心硅钢片绝缘十分重要。因铁心短路可造成铁心局部温度过高，严重时会损伤绕组绝缘，甚至会烧毁铁心；因铁心松动也可造成铁心振动和冲片绝缘磨损，继而引起铁心短路。定子铁心硅钢片绝缘应该有很好的附着性和硬度，高的耐热性和热稳定性（热收缩率小）以及一定的电气强度。

硅钢片绝缘可分为两种：一种是硅钢片生产厂在生产时带来的，这种在硅钢片双面附着的绝缘是一种硅酸盐或磷酸盐的涂层，它的厚度薄且具有较好的机械强度但绝缘电阻偏低，可满足一些小容量电机的要求；另一种是在硅钢片冲成冲片后再涂敷到冲片双面的绝缘涂层。这种绝缘涂层的绝缘性能较高，一般中型和大型电机都采用这种硅钢片绝缘。

涂敷到硅钢片冲片上的漆叫硅钢片漆。有机硅钢片漆是目前国内应用最多的硅钢片漆，主要品种有B级1611、F级9162、9163等。这种漆流平性和附着性好，具有较好的绝缘性能，应用工艺较简单，但涂层硬度低，耐热性和热稳定性较差，热收缩率较大，容易引起铁心松动，涂层厚且有严重边缘增厚现象，影响铁心装压系数。

20世纪80年代开始，国内开始开发半无机硅钢片漆，并于90年代开始陆续在大型电机上应用。所谓半无机硅钢片漆系指漆中既有有机成分，又有无机成分。而其中的有机成分主要是水溶性有机树脂，无机成分是无机填料。半无机硅钢片漆由于引入了无机填料，不仅能使涂层具有一定的遮盖能力，增加色彩和保护作用，从而弥补了漆料之缺欠，增强涂层本身的硬度及耐久性、耐候性，而且能增强涂层耐过热的能力。当电机铁心由于种种原因出现局部过热时，硅钢片绝缘涂层中的有机成分将发生碳化或挥发，而无机填料由于其具有良好的耐高温性能和介电性能，将基本完好地保留在铁心硅钢片层间，这就防止了铁心的松动和铁心的短路，从而避免事故发生。半无机硅钢片漆还具有涂层厚度小，采用水作溶剂等优点，成为高压大型电机定子硅钢片冲片首选硅钢片漆。表1.5-10列出有机硅钢片漆与半无机硅钢片漆的主要性能比较。

但目前国产水溶性半无机硅钢片漆尚存在一些不足，如涂层在冲片断面的覆盖率差，易于导致冲片断面生锈，涂层的附着性也有待提高。

除了有机硅钢片漆和半无机硅钢片漆外，国外西屋公司还开发出了全无机硅钢片漆。

表 1.5-10 有机硅钢片漆与半无机硅钢片漆性能比较

漆膜性能	单 位	标 准	有机硅钢 漆	半无机硅钢片漆
漆膜硬度	—	—	0.83	0.965
漆膜附着性	—	—	1级	1级
温度指数	—	—	—	172
Franklin 电流	A	—	0.150	0
Crown test 电阻	$\Omega \cdot cm^2$	1×10^6	$>2\times10^9$	$>2\times10^9$
Franklin 烧损电流	A	0.2	0.74	0.34
耐弯曲	—	不裂不脱	不裂不脱	不裂不脱

注 1. 表中有机硅钢片漆为9163，半无机硅钢片漆为9165。
2. Franklin电流：用10个面积为$1cm^2$的金属电极并联测试单片硅钢片同面涂层上的流经硅钢片绝缘涂层的电流值，测试条件：温度（150±5）℃/压力5.2MPa/直流电压0.5V。
3. Crown test电阻：测量两片硅钢片之间绝缘电阻的方法，测试时两片硅钢片上下电极面积各为$10cm^2$，施加压力2.81MPa。
4. Franklin烧损电流：用火焰烧或650℃ 15h去除硅钢片漆膜中有机成分后，再用注2方法测试电流值。

2.2 转子绕组绝缘结构

同步电机转子绕组绝缘的主要特点是受到的各种机械应力大，对绝缘的机械性能要求高；转子绕组的电流大、温度高，对绝缘的耐热性能要求严格。

2.2.1 凸极转子绝缘结构

水轮发电机和转速较低的同步电动机大都采用凸极转子结构。凸极转子的线圈大多采用矩形铜排（四边形、五边形或七边形铜排）扁绕或钎焊而成。因为转子绕组的工作电压较低，一般只有几百伏，所以转子绕组的绝缘大多采用裸式绝缘，以利于散热。

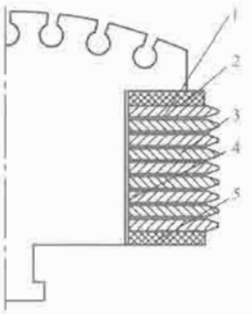


图 1.5-10 单层多匝磁极线圈绝缘结构
1—匝间绝缘；2—上托板；3—线圈；4—极身绝缘；5—下托板

凸极转子绕组的绝缘主要由两部分组成，即匝间绝缘和对地绝缘（见图1.5-10）。转子绕组的匝间绝缘即转子线圈相邻两匝间的绝缘。凸极转子线圈（又称磁极线圈）的匝间绝缘通常为垫条式结构，在相邻匝的两根铜排间垫上与铜排宽度相当的垫条，然后用热压方法或其他方法使垫条与铜排黏牢。

过去匝间绝缘材料大多采用上胶玻璃布，如环氧酚醛上胶玻璃布、间苯二酚上胶玻璃布等，其中用间苯二酚上胶玻璃布压制而成的间苯二酚玻璃布板在150℃下抗弯强度可以达到其室温抗弯强度值的50%以上，比环氧酚醛玻璃布板高很多，因此近年来间苯二酚上胶玻璃布已逐渐代替环氧酚醛上胶玻璃布用来作F级转子线圈匝间绝缘。

聚芳酰胺纤维纸（Nomex）近来也越来越多地用作匝间绝缘。这是因为Nomex-410质地密实、韧性好、压缩蠕变小，耐热性能优良。将Nomex-410用于转子线圈匝间绝

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

缘通常是先把 Nomex-410 上胶，然后按需要切成一定宽度的纸带，再垫在转子线圈的匝间铜排上，最后将垫好匝间垫条的转子线圈放入压力机进行热压，使匝间绝缘固化。Nomex-410 的厚度一般采用 0.127mm 的，每个匝间垫 2 层，匝间绝缘厚度为 0.26mm。也可采用 0.254mm 厚的 Nomex-410 来作匝间绝缘，但每个匝间只能垫一层，这就要求对匝间垫条的接缝处理非常仔细，防止因垫条窜位引起匝间短路。

凸极转子绕组的对地绝缘可分为组合式和整体式两种。所谓组合式对地绝缘是指转子磁极线圈的对地绝缘是由几部分绝缘组合而成的（见图 1.5-11）。如磁极线圈的内框与磁极极身铁心接触处为云母箔卷包的绝缘或环氧玻璃布板或压制件，磁极线圈上下面则为环氧玻璃布板加工成的绝缘托板，极身绝缘与托板之间存在的缝隙有时用填料填充，有时加垫一层 L 型垫条。而整体式对地绝缘（见图 1.5-12）是指磁极线圈的内框和上下面的绝缘是整体的连续的，即相当于极身绝缘和绝缘托板合二为一。因为这种整体式对地绝缘结构的剖面成匚形。因此也可叫匚形绝缘结构。这种匚形绝缘结构完全消除了组合式对地绝缘存在的极身绝缘与绝缘托板之间的缝隙，从而极大地提高了磁极线圈的绝缘电阻和爬电电压。当然，由于匚形绝缘的上下两边的绝缘厚度有限，所以实际上采用整体匚形对地绝缘的磁极线圈还是有绝缘托板的，这主要是为了解决磁极线圈外圆铜排对磁极铁心之间的爬电间距。整体匚形对地绝缘采用上胶聚芳酰胺纤维纸为材料，直接在压好匝间绝缘的磁极线圈上成型、压制、固化，因此，对地绝缘与磁极线圈铜排黏结成整体。这种磁极线圈的整体匚形对地绝缘结构性能好，运行可靠，正在许多大型重要电机上应用。但由于 Nomex 的价格昂贵，匚形对地绝缘的制造工艺比较复杂，使这种绝缘结构的应用受到一定限制。

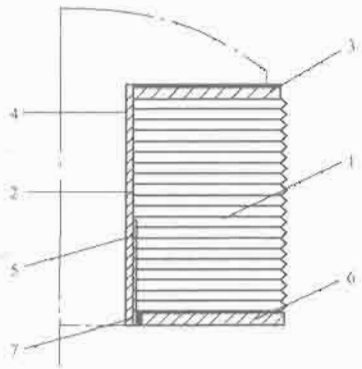


图 1.5-11 组合式极身绝缘磁极线圈
1—匝间绝缘；2—极身绝缘；3、4、5—L 形绝缘；
6—托板绝缘；7—填充物

2.2.2 隐极转子绝缘结构

汽轮发电机以及一些转速高的同步电动机通常采用隐极式转子结构。隐极式转子由于受空间尺寸限制，总是要求其转子绕组的绝缘尽可能薄；而由于隐极式转子的转速很高，产生的离心力以及热胀冷缩应力大，因此对转子绕组绝缘机械强度要求很高；同时由于转子绕组电流大，散热条件不均匀，因此对转子绕组绝缘耐热性能要求比较严格。很多电机的转子绕组温升计算为 B 级，但要求转子绕组绝缘的耐热等级必须为 F 级。

隐极式转子绕组绝缘也是由匝间绝缘和对地绝缘两部分

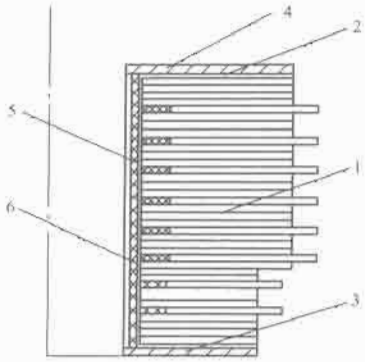


图 1.5-12 整体式极身绝缘的磁极线圈
1—匝间绝缘；2—匚形极身绝缘；
3、4—绝缘托板；5—层压玻璃布板；
6—填充用上胶涤纶毡

组成。大型电机如大型汽轮发电机的隐极式转子线圈通常用裸扁铜排绕制而成，匝间绝缘大多采用垫条式结构。隐极式转子线圈也有采用电磁线绕制而成的，其电磁线绝缘就是匝间绝缘。对匝间绝缘有如下要求：①有足够的耐热性。转子绕组电流大、温度高，温度分布不易均匀，存在局部过热点的概率较大，转子绝缘应该有承受一定过热的能力；②有高的机械强度。转子是电机的旋转体，转子绕组在旋转中会产生很大的离心力，这些离心力施加在匝间绝缘上，使匝间绝缘受到很高的离心应力。转子绕组上离心力的大小与转子的旋转速度的平方，绕组的重量和绕组的重心直径成正比［离心力计算公式 $C=5.6\times G\times D\ (n/1000)^2$］。据计算，高速电机的转子绕组最靠近定子的线匝上的离心力可达 70～100MPa。在如此高的离心应力和高温下绝缘不应失去其强度。③有良好的韧性和小的摩擦系数。这是为了适应转子线圈各匝间可能存在的位移和剪切力而提出来的。④有一定的耐电强度。因为转子绕组的工作电压不高，分布到各匝间的电压一般只几伏。但考虑到可能受到一些冲击电压的侵袭，通常转子线圈的首末两匝要适当加强匝间绝缘。垫条式匝间绝缘的结构与转子线圈的冷却方式有关。我国早期的氢内冷汽轮发电机转子线圈的通风槽在线圈铜排的两外侧（开口式），其匝间绝缘用环氧上胶玻璃布直接压制到铣好通风槽的铜排上，匝间绝缘固化后再锉去通风槽处的绝缘。20 世纪 80 年代国内开始生产铜排中间带通风孔的汽轮发电机转子线圈，其匝间绝缘通常用单面毛面的环氧玻璃布板或三聚氰胺玻璃布板垫条事先冲好通风孔，然后与铣好通风孔的铜排热压在一起。热压时需在垫条与铜排之间涂刷黏合胶。这种黏合胶应该有很好的高低温黏结强度（可用黏合胶黏结两片铜板或钢板，然后测试其剪切强度来表示）、黏合胶固化后其胶膜最好还应该有一定韧性或弹性。这类黏合胶大多含有一定比例的橡胶成分。除了采用垫条式匝间绝缘的转子线圈，有的汽轮发电机转子线圈还采用过绕包式匝间绝缘结构。例如采用水内冷的转子线圈，是用矩形空心铜线绕制而成，其匝间绝缘就曾采用过垫条加绕包云母带的匝间绝缘结构。20 世纪 50 年代开始生产的 50MW 氢外冷式转子线圈，也是采用硅有机玻璃片云母带垫条加硅有机玻璃丝粘带包绕的匝间绝缘结构。由于包绕型的匝间绝缘结构厚度较大，又不利于线圈散热，因此逐渐被完全垫条式匝间绝缘结构代替。表 1.5-11 列出国内几种汽轮发电机转子线圈匝间绝缘情况。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.5-11 国内汽轮发电机转子线圈匝间绝缘结构

电机容量（MW）	50	100、200	60、200	100	300	600
转子冷却方式	氢外冷	氢内冷	水内冷	水内冷	氢内冷	氢内冷
匝间绝缘厚度（mm）	0.5	1.0	1.0	0.8	0.45	0.40
匝间绝缘耐热等级	H	F	B	F	F	F
匝间绝缘结构型式	硅有机玻璃片云母垫条，黏带包绕	环氧酚醛玻璃坯布压制	环氧玻璃布板垫条，片云母带包绕	OHO垫条，聚酰亚胺薄膜黏带包绕	环氧玻璃布板垫条	三聚氰胺玻璃布板垫条

隐极式转子绕组的对地绝缘可分为三部分，即转子线圈槽部与转子本体之间的绝缘-槽衬；转子线圈槽部与金属槽楔之间的绝缘-楔下垫条；转子线圈端部与金属护环之间的绝缘-护环绝缘。其中槽衬是隐极式转子绕组最重要的对地绝缘。转子线圈在槽部的示意图如图 1.5-13 所示。

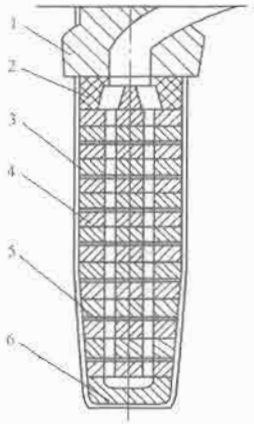


图 1.5-13 转子线圈槽部结构示意图

1—槽楔；2—楔下绝缘垫块；3—槽衬；4—铜线；5—匝间绝缘；6—槽底垫条

汽轮发电机的转子槽衬因受空间位置限制，除要求具有长期耐电强度外，还要求厚度小、机械强度高。特别是槽衬在制造和运行中要受到多种机械应力作用，这些机械应力常引起槽衬介电强度的丧失。因此对大型汽轮发电机槽衬来说，对槽衬机械强度的要求往往比其介电强度更重要。

转子槽衬的绝缘结构与转子绕组的冷却方式有一定的关系，与合成材料的进步也有关系。20 世纪五六十年代，生产空外冷或氢外冷转子的汽轮发电机时，转子槽衬一般用虫胶塑型片云母板来压制。槽衬成型后下入转子槽内，嵌入转子线圈，然后加热槽衬上部并使之弯倒压住转子线圈的最上一匝。这种槽衬结构使槽部线圈上下封闭在槽衬之内，槽口处的爬电距离长，可以减薄转子楔下绝缘垫条的厚度。这种可塑型的转子槽衬到了 20 世纪 90 年代，材料由塑型云母板变为聚芳酰胺纤维纸（Nomex），槽衬的耐热性能和机械性能都有了很大的提高。对于转子为氢内冷型的汽轮发电机，因为需要从转子线圈槽部的上部进风和出风，所以其转子槽衬不能采取上下封闭的结构型式，而是采用 U 形或开口倒梯形。氢内冷型转子线圈的槽衬通常用环氧上胶玻璃布用模压法压制而成。国外也有用热固型片云母板来压制槽衬的，如美国西屋公司。

压制 F 级槽衬的环氧上胶玻璃布早期大多为环氧酚醛上胶玻璃布，后来逐渐改为间苯二酚环氧上胶玻璃布或其他环氧上胶玻璃布，因为后者的热态抗弯强度比前者高得多。用环氧上胶玻璃布热压而成的槽衬实质是一种环氧玻璃层压制品，它具有很好的机械强度和介电强度。但单纯的环氧玻璃层压制品有易碎特性。当这种层压制品受到应力产生不大的变形时就会出现裂纹。如果同时存在电应力，裂纹就会导致电气击穿。为了克服这个缺点，国内从 20 世纪 80 年代开始采用一种“夹心式”环氧玻璃布层压槽衬。所谓“夹心式”环氧玻璃布槽衬是指在组成槽衬的多层环氧上胶玻璃布中间夹 1 层柔软复合箔（NHN）。这层柔软复合箔 NHN 是由二层聚芳酰胺纤维纸（Nomex）和一层夹在中间的聚酰亚胺薄膜复合而成。这种槽衬结构有这样一些特点：由于加了一层绝缘薄膜，不仅可提高槽衬的介电强度，而且可增强槽衬抗变形损坏的能力。这是因为这层绝缘薄膜位于力学的中性轴线上，断裂应变幅值较大。当槽衬受到弯曲等应力产生形变时，即使薄膜两面的合成树脂玻璃布层压层出现裂纹，薄膜也不致以断裂，这样就可使槽衬保持一定的介电强度。而薄膜两面的聚芳酰胺纤维纸借助其结构上较疏松的特性，不仅可起保护薄膜的作用，还可部分吸收加在槽衬上的应力，从而减小槽衬的变形。“夹心式”槽衬壁厚方向两外层的环氧玻璃层压层可提供槽衬所需的机械强度和整体刚度。表 1.5-12 列出“夹心式”间苯二酚环氧玻璃布槽衬的一些常规性能。另外，根据模拟试验对比，证明“夹心式”环氧玻璃布槽衬在抗压力方面性能优于片云母槽衬。对于个别大容量汽轮发电机，有在转子槽衬内侧靠近转子铜线一面加滑移层的，目的是减小因转子铜线与槽衬热膨胀率不同而引起的应力对槽衬的损伤。

表 1.5-12 “夹心式”间苯二酚环氧玻璃布槽衬的常规性能

项 目	拉伸强度		弯曲强度		体积电阻率		表面电阻率	介电强度
	常态	150℃	常态	150℃	常态	150℃		
单 位	MPa		MPa		Ω·m		Ω	MV/m
槽衬试样	226.5	202.1	373.0	178.5	1.4×10^{13}	1.2×10^{11}	2.7×10^{14}	35
瑞士 Micafil 公司 Vetrelam410 指标	>200	>150	250.0	175.0				25

注 Vetrelam410 也是一种“夹心式”环氧玻璃布槽衬。

隐极式转子线圈在转子槽部的另一个对地绝缘-楔下垫条对于氢内冷型转子绕组也十分重要。因为氢内冷型转子线圈的最上一匝为裸铜排，而转子槽楔又为金属槽楔，这两者之间依靠楔下的绝缘垫条来隔开，而且这种楔下绝缘垫条中间还开有和裸铜排相对应的通风孔。所以楔下绝缘垫条就构成转子线圈对地绝缘的一部分。如果楔下绝缘垫条的厚度不够，则在进行转子绕组对地耐电压试验时，转子绕组就可能沿着楔下绝缘垫条爬电击穿。通常氢内冷型转子绕组的楔下绝缘垫条的厚度要根据试验电压值来决定。试验电压为 4100V（交流有效值）时，绝缘垫条厚约为 9.5mm，试验电压 4800V，垫条厚约 11mm，试验电压 5500V，垫条厚约 13mm。

因为楔下绝缘垫条在运行时会受到很大的离心力，以及因转子铜线与转子本体之间热膨胀率不同而造成的相对位移

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

加上离心力而产生的摩擦应力，所以，楔下绝缘垫条都用高强度环氧玻璃层压板制成。大容量汽轮发电机的转子楔下绝缘垫条还常常在垫条靠铜线一面增加一层滑移层。滑移层可以是一层聚四氟乙烯纤维与棉纤维混织布黏结在垫条上，也可以在垫条上喷一层摩擦系数小的耐磨涂层。

护环绝缘是汽轮发电机转子绕组在端部的一种对地绝缘。汽轮发电机在运行时转子绕组端部会因离心力作用企图离开原来位置挤向定子与转子间的气隙，为此需用护环来加以限制。这样在裸露的转子绕组端部铜线与金属护环之间就须有对地绝缘—护环绝缘。护环绝缘根据其结构型式不同可分为两种，即护环绝缘瓦（又称扇形瓦绝缘）和护环绝缘筒。顾名思义护环绝缘瓦就是瓦片形状的合成树脂玻璃层压制品。通常用4块绝缘瓦覆盖一个圆周的转子绕组端部。为了解决爬电电压问题，采用双层绝缘瓦结构，外层绝缘瓦与内层绝缘瓦的接缝错开。安装时先装好转子绕组端部的护环绝缘瓦，再热套护环。而护环绝缘筒则是一种两端开口的筒状合成树脂玻璃纤维缠绕制品。安装时先将护环绝缘筒装入护环内，然后再将护环（包括绝缘筒）套入转子绕组端部。因护环绝缘筒的制造工艺复杂、成本高、修复困难、应用范围较小。随着汽轮发电机容量增大，转子绕组轴向长度加长，转子绕组与转子本体之间运行时产生的相互位移加大，转子绕组端部与护环之间（通过护环绝缘）摩擦力也变大。为了改善这种应力对线圈和护环绝缘造成的影响，大型汽轮发电机转子护环绝缘也开始采用滑移层结构。

2.3 定子线圈和绕组绝缘工艺

绝缘工艺同绝缘结构以及绝缘性能是密不可分的。先进的绝缘结构要靠先进的绝缘工艺来实现。好的绝缘性能也要通过好的工艺来得到。

同步电机定子线圈和绕组的绝缘工艺随绝缘材料和绝缘结构的变化而变化。在20世纪50年代，定子线圈采用沥青片云母带作主绝缘。定子线圈主绝缘成型工艺为真空压力浸渍沥青胶。由于沥青胶黏度大，每次能浸透的云母带层数有限，因此大型高压线圈有时要分别进行二次甚至三次绝缘包扎和浸胶。20世纪60年代国内开始采用环氧粉云母带绝缘，这时定子线圈（线棒）绝缘的成型工艺有两种：一种是模压工艺；另一种是液压工艺。20世纪80年代起，国内研制成功高压电机定子绕组真空压力浸渍环氧无溶剂浸渍树脂绝缘系统，绝缘成型工艺采用真空压力浸渍（VPI）。下面将分别介绍高压定子绝缘用模压工艺、液压工艺和VPI工艺。

2.3.1 模压工艺

所谓模压工艺是定子线圈（线棒）用多胶环氧粉云母带包扎完主绝缘后，将线圈（线棒）放入热压模中进行加热压型，使绝缘成型的一种绝缘工艺方法。模压工艺的特点是，在没有真空过程和补充胶黏剂的情况下，依靠云母带中的胶黏剂来填充绝缘层中的空隙，使线圈（线棒）绝缘成为整体性好的绝缘。为了得到性能优良模压成型的定子线圈（线棒）绝缘，必须注意如下问题：绝缘用多胶环氧粉云母带的挥发物要小，一般控制在0.7%～1.1%之间；多胶环氧粉云母带的胶黏剂有较宽的胶化时间，工艺适用期较长，胶化时间一般控制在170℃ 10～14min之间，压模各部分温度分布应均匀……模压的关键工艺是掌握好加压力的温度和时间，使云母带中的胶黏剂在流动状态下完全填充绝缘中各云母带层之间的空隙。为此模压时通常采用分阶段加压力的方式，如当模具和线圈温度达120～130℃时加初压，而当温度达170～180℃加全压。具体的加压力的温度和时间可根据云母带的参数作调整。压模和线圈的加热方式有两种：一种是采用模具加热法，即模具上安装电热元件或汽热元件，热量从模具传递给线圈的绝缘和铜导体；另一种是采用线圈大电流加热法，即在模具上的线圈（线棒）导体上通以大的低压交流电流，这样不仅使线圈导体发热，而且使模具（钢质）因感应涡流而发热。这种线圈大电流加热法由于具有温度均匀、升温较快、模具设计较简单等优点，很长时间以来一直是大型线圈（线棒）绝缘模压工艺应用最多的加热方式。压模的加压力方式也分手工和油压两种。手工加压方式是通过手工拧螺栓来加压或松压；油压加压方式是通过油压机的压头来对模具加压和松压。油压加压方式不仅压力均匀、省力，加压松压速度快，而且能始终保持恒压，有利于提高模压绝缘质量。

用模压工艺成型的高压定子线圈（线棒）绝缘尺寸规整，线圈形状好，绝缘整体性和其他性能也很优良，是大中小型各种电机常用的一种线圈（线棒）绝缘成型方法。

2.3.2 液压工艺

所谓液压工艺是相对于前述模压工艺来说的，主要是指线圈（线棒）主绝缘成型固化过程中是用液态沥青胶作为传递热和压力的一种绝缘成型方法。具体来说，液压工艺的流程是：先在用多胶环氧粉云母带包扎完主绝缘的定子线圈（线棒）的槽部和端部分别包上脱模材料（如聚四氟乙烯薄膜）和定型夹板（槽部为双L形夹板），再在外面包上密封材料形成密封层（如聚酯薄膜），密封一定要严密，不能让液态沥青渗入密封层内。然后将线圈装在浸渍架上并按线圈形状固定好，放入液压罐中。液压罐大多为立式，一般都由原沥青浸渍罐改成。线圈放入液压罐后，经过预热和真空后，将沥青胶由储胶罐输入到液压罐中。此时线圈被迅速加热。当线圈绝缘温度达到130～140℃时，用压缩空气对沥青胶加初压力，而沥青胶将压力传递到线圈绝缘上，这时绝缘中的云母带环氧胶黏剂处于可流动的半胶化状态，在压力下环氧胶黏剂从云母带中流出，填充云母带层之间空隙。最后加上全压（压强约0.7MPa），并保持8h以上，同时保持线圈温度在165～170℃之间。待绝缘固化完全后，除去压力，将沥青胶输回储胶罐，再把线圈连同支架吊出液压罐。除去线圈外面包裹的密封材料、夹板和脱模材料，线圈绝缘的液压工艺过程就结束。

用液压工艺成型的高压定子线圈（线棒）由于在绝缘成型过程中引入了真空处理工序，所以绝缘的整体性较好。但是由于线圈定位不好，所以线圈的几何形状较差。此外液压设备复杂，造价高，不利于推广。

2.3.3 真空压力浸渍（VPI）工艺

高压同步电机定子线圈绝缘的真空压力浸渍（VPI）工艺分为线圈VPI和绕组VPI两种。

线圈VPI的工艺过程为：用少胶云母带包绕线圈主绝缘，然后将线圈进行真空压力浸渍无溶剂浸渍树脂。浸渍后将线圈取出，将线圈槽部和端部夹上夹板，并按线圈形状固定在支架上，送入烘炉中烘焙，使绝缘固化成型。或一组线圈装在夹具中进行真空压力浸渍，然后将线圈连同夹具一起进烘炉烘焙，使绝缘固化成型。

而绕组VPI的工艺过程则为：用少胶云母带包绕线圈主绝缘，然后将线圈嵌入定子铁心槽中。接好线后，将绕组和铁心一起进行真空压力浸渍无溶剂浸渍树脂。浸渍后，直接将绕组铁心送入烘炉中烘焙，使绝缘固化成型。图1.5-14所示为绕组VPI工艺过程框图。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

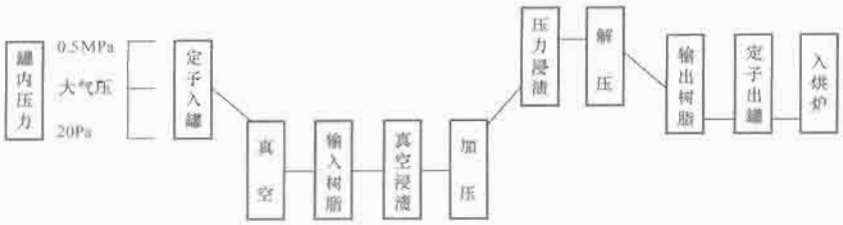


图 1.5-14 定子 VPI 的工艺流程

真空压力浸渍（VPI）工艺的特点是引入了真空和压力浸渍过程，从而最大限度地排除了绝缘中的气隙，提高了绝缘的整体性。同时 VPI 绝缘采用单面补强少胶云母带来包绕主绝缘，这种云母带的胶含量在 10%以下，云母含量则高达 80%，即使在浸渍无溶剂浸渍树脂后，绝缘中的云母含量仍然高达 60%以上，这样就极大地提高了绝缘的长期耐电性能。另外，对绕组 VPI 来说，由于是对绕组铁心（即定子）整体进行 VPI 处理，在绕组绝缘内部得到充分浸渍的同时，绕组外部也同样被浸渍，使绕组槽部与铁心槽之间的间隙被浸渍树脂填充，从而加强了绕组在槽部的固定，改善了绕组的散热条件。绕组端部的固定也会有很大的增强。

真空压力浸渍（VPI）工艺的技术关键在于如何保证绝缘层能被浸渍树脂完全浸透，使之成为无气隙的绝缘。为此常常采取如下措施：

1）少胶云母带的胶含量尽可能小，一般胶含量在 10%以下，有的少胶带胶含量仅为 4%±1.5%。少胶云母带的粉云母纸采用透气性较好的鳞片粉云母纸。有时为了检验粉云母纸的渗透云母带胶的性能，要进行粉云母纸的渗透性试验。

2）浸渍树脂采用黏度小的无溶剂浸渍树脂。大多数无溶剂浸渍树脂常温下黏度很小，可在常温下浸渍。但有个别无溶剂浸渍树脂在常温下的黏度大，需加热到较高温度使黏度降下来才能浸渍。如西门子公司的一种环氧无溶剂浸渍树脂（ET884）由于室温下黏度大，故浸渍树脂需加热到 70℃，这时黏度降到 45mPa·s 以下。浸渍树脂采用无溶剂对于绝缘来说也很重要，因为这样可以避免在绝缘浸漆后烘焙时由于溶剂的挥发而在绝缘内形成气孔。

3）VPI 处理时的真空度要高，浸渍时的压力较大。真空度和浸渍压力是 VPI 工艺的两个最重要工艺参数。真空度越高，留存在绝缘中的气体就越少，就越容易得到无气隙的绝缘；浸渍压力越大，浸渍树脂越容易浸进绝缘层中，就越容易得到浸透性好的绝缘。当然浸渍压力值的大小与真空度、VPI 设备造价等因素有关，不是越大越好。

4）减少烘焙时浸渍树脂从绝缘中流失。浸渍后的线圈或绕组在加热烘焙时，随着温度的升高，浸进线圈或绕组上的浸渍树脂的黏度就会变小（在浸渍树脂胶化之前），黏度变小的树脂很容易从绝缘层中流出来，从而造成绝缘中出现空隙。为了避免这种情况，通常采用快速升温，或在烘炉中放置催化剂，以使绝缘表面的浸渍树脂尽快胶化，封住绝缘层内的浸渍树脂；另外在绝缘表面采用热收缩型的材料来包绕，利用这些在外表面的热缩材料的收缩封住浸渍树脂流出的出口，从而减少树脂的流失。这种热缩材料中，有用热缩性聚酯薄膜与聚酯纤维复合而成的表面保护带（又称单面透气带），有用玻璃纤维与涤纶纤维交织而成的涤玻交织带。烘焙时使浸渍工件旋转也能有效减少树脂的流失。

有一种检验在 VPI 过程中绕组绝缘浸渍效果的方法在一些电机厂应用。这种方法就是检验绕组绝缘在浸渍前后电容量的变化来判断绝缘是否被浸渍树脂完全浸透。因为在浸渍前，绝缘层除了云母带，在云母带层之间还含有空气或真空（当抽真空时），这时由线圈导体与定子铁心槽之间形成的电容较小（空气的介电系数小），而在浸渍树脂浸进绝缘中并完全填充所有云母带层之间的空隙后，由于浸渍树脂的介电系数比空气（或真空）的介电系数大好几倍，因此这时由线圈导体与定子铁心槽之间形成的电容就增大好几倍。这个电容逐渐增大过程反映着浸渍树脂浸进绝缘层的过程。

用真空压力浸渍（VPI）工艺成型的高压定子线圈或定子绕组绝缘由于绝缘中的云母含量较高，耐长期电老化性能优良，成为许多外国公司大型高压电机首选的绝缘方式。国内这几年也在大力发展这种绝缘方式，特别是近几年大型空冷型汽轮发电机纷纷采用 VPI 整浸绝缘或模压与 VPI 整浸相结合的绝缘，使得空冷汽轮发电机的单机容量不断增大。现国内已能生产 220MW 空冷汽轮发电机，正在设计更大容量的大型空冷汽轮发电机。

2.4 转子线圈和绕组绝缘工艺

2.4.1 凸极转子线圈和绕组绝缘工艺

凸极转子线圈（即磁极线圈）的匝间绝缘大多采用垫条式结构，绝缘垫条本身含有胶黏剂，所以成型时把垫好匝间垫条的磁极线圈放到压力机上，在磁极线圈上通上直流电流使匝间垫条加热到需要的温度，同时加上压力，并保温保压一定时间使匝间绝缘固化成型。这样，匝间垫条就和磁极线圈的铜线黏结在一起，整个磁极线圈成为一个整体。压制磁极线圈匝间绝缘的关键工艺参数是温度和压力，它们与绝缘垫条上的胶黏剂有关。如何防止磁极线圈匝间短路是一大技术关键，为此需从多方面加以注意。例如应选择密实、抗压、韧性好的材料来作匝间绝缘；磁极线圈铜线或铜排应平整、厚度均匀、无毛刺；扁绕而成的磁极线圈的内转角增厚要认真锉平或用能限制铜线内转角增厚的扁绕设备来绕线；垫匝间垫条时要准确并采取措施防止垫条窜位（如用胶黏剂或转移黏带将垫条黏牢在铜线上）。

磁极线圈的对地绝缘如采用整体式结构（匚形结构），其所用材料为上胶聚芳酰胺纤维纸（上胶 Nomex），它的热压成型工艺类似于用上胶 Nomex 作匝间绝缘的匝间绝缘热压成型工艺。这种对地绝缘与磁极线圈铜排粘成整体的磁极线圈在套入磁极铁心时，在其间还需垫入上胶涤纶毡，其目的是既保护磁极线圈对地绝缘，又填充间隙，减少因磁极线圈与铁心松动而产生的振动。

2.4.2 隐极转子线圈和绕组绝缘工艺

隐极式转子线圈的匝间绝缘采用垫条结构时，一般都将槽部匝间垫条在下线前黏结到线圈铜排上。早期的内冷式转子线圈通风槽开在铜排边上，匝间绝缘是环氧酚醛上胶玻璃布热压到事先开好通风槽的铜排上，然后锉去通风槽处的环氧酚醛玻璃布层。20 世纪 80 年代起内冷式转子线圈改为铜

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

排中间铣孔式结构或冲孔式结构，其匝间绝缘采用环氧玻璃层压板垫条或三聚氰胺玻璃层压板垫条冲好通风孔后，再与对应的转子线圈铜排用黏结胶热压在一起。转子线圈端部的匝间垫条则大多都是在线圈下线时垫上去的。为了使端部匝间垫条与铜排能够黏结牢固，除了应选择合适的黏结胶外，还要严格按黏结工艺操作。隐极式转子线圈的对地绝缘一槽衬基本有两种形式：一种是适用于中小容量电机的不成型槽衬，这种槽衬可以不事先压制成型，其材料一般为 Nomex 或 NMN、NHN 等；一种是适用于大中型汽轮发电机的成型槽衬，这种槽衬需事先热压成型，其材料通常为环氧上胶玻璃布加 NHN 等。

3 感应电机绝缘

感应电机是现代工业的拖动力，它广泛应用于工业的各个方面，感应电机往往起动频繁，受到的环境影响十分严酷，因此对绝缘的要求也很高。

3.1 感应电机定子绝缘结构

3.1.1 匝间绝缘结构

感应电机的定子线圈大多是由多个串联匝组成的圈式线圈，其匝间绝缘是电机绕组绝缘的重要组成部分。由于感应电机特别是感应电动机起动比较频繁，使定子绕组经常受到冲击电压的侵袭。真空开关的应用，使操作过电压的波头变得很陡。采用脉宽调制（PWM）技术的逆变器供电时，电压中通常含有反复出现的冲击电压成分。有的感应电动机直接与电网连线，其定子绕组还会受到大气过电压的作用。当波前时间很短的冲击电压施加在定子绕组的端头和地之间时，该相绕组的所有部位不可能在冲击电压的波前时间内突然达到同一电位。这时在绕组上会出现两种类型的电压上升：绕组铜导体与地之间的电压（横向电压）以及沿绕组铜导体长度上的电压（纵向电压）。当横向电压威胁主绝缘的同时，纵向电压威胁着匝间绝缘。两种类型的最高电压通常均出现在绕组的第一个线圈或绕组入口线圈上，如图 1.5-15 和图 1.5-16 所示。

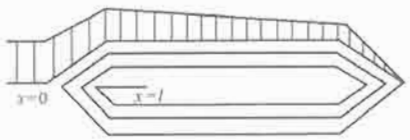


图 1.5-15 冲击电压在多匝圈式线圈上的传播

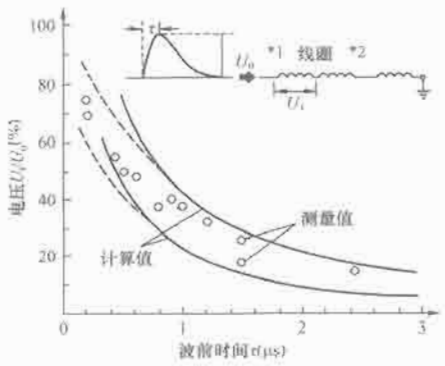


图 1.5-16 冲击波施加在第一个线圈上的电压与波前时间的关系

感应电机匝间绝缘通常由两部分组成，即导体绝缘（电磁线绝缘）和匝间包绕的绝缘或垫的垫条。采用什么样的匝间绝缘，既与电机的额定电压有关，也与线圈的匝数有关，而最终是与匝间绝缘应有多大的承受冲击电压的能力有关。根据国内外对各种冲击波在电机绕组中的传播理论的研究和实际监测结果，表明由真空开关造成的冲击电压的波前时间可达 0.2μs，幅值最大可达 4.6 倍相电压幅值。当波前时间为 0.2μs 的冲击电压侵入定子绕组时，在各线圈间的电压分布是很不均匀的。相首第一个线圈上承受的电压可达冲击电压幅值的 70%以上。冲击电压在第一个线圈各匝间的分布情况与冲击电压的波前时间值的大小有很大关系，当冲击电压的波前时间不小于 0.5μs 时，冲击电压在第一个线圈各匝间的分布可认为是比较均匀的。而当冲击电压波前时间等于或小于 0.2μs 时，则线圈首匝上的电压可高达 37%以上，其余各匝上的电压分布则基本均匀。

为了强化感应电机定子绕组匝间绝缘的强度，规范匝间绝缘的试验工作，IEC34-15 规定，额定电压 3～15kV 的交流电机定子成型线圈匝间绝缘必须具有承受峰值为（$4U_N$+5kV）计算值的 50%，波前时间不小于 0.5μs 的冲击波不少于 5 次冲击的能力。1995 年 IEC 又颁布了 IEC34-15 第二版，提高了对匝间绝缘耐冲击电压水平的要求，将试验用冲击电压的幅值由（$4U_N$+5kV）×50%改为（$4U_N$+5kV）×65%，试验用冲击电压（衰减振荡波）的波前时间由 0.5μs 改为$(0.2^{+0.3}_{-0.1})$μs。我国也先后颁布了 JB/T 10098—1999（原 JB/Z 293—1987）和 JB/T 10098—2000 标准，规范国内交流电机定子线圈匝间绝缘试验方法和标准。

上述国际标准和国内标准，为设计感应电机定子线圈的匝间绝缘提供了很好的基础。首先，线圈匝间绝缘耐冲击电压强度必须满足 IEC34-15 规定的要求，即线圈能经受峰值为（$4U_N$+5kV）×65%，波前时间为$(0.2^{+0.3}_{-0.1})$μs 的冲击电压 5 次冲击。其次，认为冲击电压在线圈各匝间的分布是基本均匀的。于是，每个匝间承受的平均冲击电压就是线圈承受的冲击电压除以每个线圈的匝数 N，即（$4U_N$+5kV）×65%/N。第三，如果冲击电压波前时间小于 0.2μs，则冲击电压加在线圈首匝的电压值将大于各匝的平均值。为此，设计的匝间绝缘介电强度应高于计算出的每个匝间承受的平均冲击电压值。具体设计匝间绝缘时，还要考虑线圈内线匝的排列方式。如线匝为双排并列平行排列时[见图 1.5-17(a)]，其各匝间的电压分布同单排线匝排列时的一样，其每个匝间承受的冲击电压值为（$4U_N$+5kV）×65%/N（N 为线圈的匝数）。这种线匝排列方式认为是标准的排列方式。在相同的额定电压下，线圈的匝数少，匝间承受的冲击电压值就大，匝间的绝缘强度就应该高；反之，线圈的匝数多，匝间承受的冲击电压值就小，匝间的绝缘强度就可以低一些。当线圈的线匝排列为双排弓形排列时[见图 1.5-17(c)]，各匝间的电压分布不完全相同。图 1.5-17(c)中线匝 1 和 4，3 和 6，5 和 8，7 和 10 之间的电压值为其他线匝之间电压值的 3 倍，因此其匝间绝缘介电强度应按其平均匝间电压值的 3 倍来考

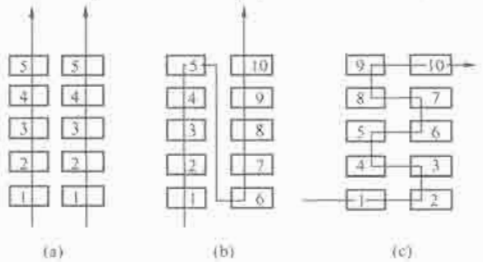


图 1.5-17 双排多匝排列方式
(a)平行排列；(b)N 形排列；(c)弓形排列

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

虑。实际设计时可以把线匝为双排弓形排列线圈的匝数除以3得到的匝数作为该线圈的匝数来设计匝间绝缘结构。例如：双排弓形排列线圈的匝数为18匝，其匝间绝缘结构按6匝来考虑。当线圈的线匝排列采取双排N形排列时[见图1.5-17(b)]，整个线圈的导线实际是由两个单排的匝数相同的导线组合而成。每个单排内各匝间的电压相同，而且电压值相对较低[平均电压值为$(4U_N+5kV)\times65\%/N$]。但两个单排导线之间的电压却很高，其值相当于线圈匝数为2匝时的电压值，即$(4U_N+5kV)\times65\%/2$。这就要求两个单排导线整个都包上较厚的匝间绝缘然后组合起来。线匝弓形排列和Z形排列的线圈导线都需要在线圈端部进行有关换位。实际生产中，大多采用标准型并列平行排列，弓形排列偶尔采用，N形排列基本不用。

设计匝间绝缘时，应以可靠性为最高准则，尽量减薄匝间绝缘厚度，积极采用新材料、新结构。为了改进线圈制造的工艺性，对匝数较多的定子线圈因每一匝承受的匝间电压较小，尽量采用电磁线绝缘作匝间绝缘，而不加包其他作匝间绝缘；而对匝数少，由多股电磁线组成一匝的定子线圈，则通常采用电磁线绝缘加包扎其他绝缘作匝间绝缘，而且以包扎其他绝缘为主。目前，国内开发出了多种可作为高压感应电机定子线圈匝间绝缘的电磁线，如玻璃丝包聚酯薄膜绕包线（B级），玻璃丝包聚酰亚胺薄膜绕包线（F级、H级），聚酯薄膜补强粉云母带绕包线（F级）等，它们都有较好的性能，能满足大多数感应电机的要求。

3.1.2 主绝缘结构

感应电机主绝缘同匝间绝缘一起是电机最重要的绝缘。感应电机主绝缘是随着绝缘材料和绝缘工艺的变化而不断进步的。20世纪五六十年代初期，高压感应电机用沥青片云母带和沥青黑漆布带或醇酸漆布带来包绕定子线圈，并浸渍沥青胶。其绝缘厚度大、耐热性较低（E级或B级）介电性能不高。20世纪60年代中期以后，环氧粉云母绝缘开始在感应电机上应用，用液压工艺或模压工艺来使环氧粉云母绝缘固化成型，圈式线圈的鼻部绝缘则采用始终柔软的漆布带或硅橡胶自粘带来包扎，以保证圈式线圈鼻部绝缘可适应线圈下线的要求。环氧粉云母绝缘的介电性能和机械性能都比沥青绝缘有很大提高，绝缘厚度也减薄了很多。

后来，对于在厂内下线装配的感应电机定子线圈，大多在包绕环氧粉云母带主绝缘以后，用模压方法使线圈的直线部分和相邻的转角部分的绝缘固化成型。线圈的鼻部也包绕环氧粉云母带，但在下线前，绝缘不固化，以保持鼻部的柔软性。当线圈下线并接线后，整个定子进行普通浸漆处理或真空压力浸渍处理，使绕组端部绝缘固化成型，同时使绕组在槽部和端部的固定得到加强。这种绝缘的介电性能和机械性能都较高。绝缘的耐热等级有B级和F级。20世纪70年代以后，国内开始开发和应用电机定子真空压力浸渍无溶剂浸渍树脂（又称定子VPI或整浸）绝缘系统。由于当时国内的少胶云母带质量较差，满足不了应用要求，所以开始时VPI绝缘大多采用中胶粉云母带或多胶粉云母带来包绕定子线圈。90年代以后才逐渐改用少胶云母带。感应电机定子采用少胶云母VPI绝缘不仅可以获得机电性能良好的绝缘，而且因减薄了绝缘厚度、缩短了制造工时而获得很好的经济效益。定子VPI逐渐成为感应电机定子绝缘的主要绝缘方式。

感应电机定子线圈主绝缘厚度与绝缘方式有很大关系，如线圈槽部采用云母箔卷包时，由于少了很多搭接缝，极大地延长了爬电距离，其主绝缘厚度比云母带绕包时的厚度可小得多。如美国西屋公司在20世纪80年代生产的感应电机，采用云母箔卷包结构时，单面主绝缘厚度为3kV 0.923mm；6kV 1.685mm。采用云母带绕包结构时，则分别为3kV 1.575mm；6kV 2.3mm。同时期的德国西门子公司6kV级云母箔卷包绝缘1.3mm，云母带绕包绝缘为1.5mm。但通常对采用卷包绝缘的电机的额定电压和定子铁心长度有限制。如西屋公司规定，额定电压7kV及以下，铁心长度1270mm以下的感应电机定子线圈才允许采用云母箔卷包结构，这是考虑到如果线圈槽部过长，卷包云母箔层数过多会影响线圈绝缘的浸渍效果。

主绝缘厚度与定子线圈绝缘工艺也有一定关系。通常采用多胶云母模压工艺的定子线圈主绝缘厚度要比采用少胶云母VPI工艺的定子线圈主绝缘厚度要厚一些。这是因为采用VPI成型线圈绝缘均匀性好，不存在模压可能压偏绝缘的问题。

主绝缘厚度还与使用的绝缘材料有一定关系。众所周知，绝缘薄膜有极高的介电强度，因此使用绝缘薄膜补强云母带与玻璃布补强云母带来混合包绕定子线圈，可以适当提高主绝缘的介电强度，从而减薄主绝缘厚度。但大多数绝缘薄膜的耐电晕性不好，故用绝缘薄膜补强的云母带一般不在10kV及以上电压的电机上使用。使用上述混包结构的定子线圈应使绝缘完全浸透、不含气隙。通常只在VPI绝缘中应用。

主绝缘厚度归根结底要由绝缘的介电强度和老化寿命来决定，要能使电机安全运行30年。表1.5-13列出国内外电机厂少胶云母定子VPI绝缘的感应电机定子线圈主绝缘厚度（单面）。感应电机定子线圈端部承受较低的电场强度，其绝缘厚度可较槽部薄一些，约为槽部绝缘厚度的70%～80%。

表1.5-13 定子线圈主绝缘厚度（单面）对照表 单位：mm

公司		西门子公司	B.B.C公司	中国
电机额定电压	3kV	0.95	0.92	1.08
	6kV	1.3	1.5	1.5
	10kV	1.8	2.25	2.4

3.1.3 防电晕结构

感应电机定子绕组的防电晕问题相对于高压同步电机来说是较简单的。额定电压6kV及以下的普通感应电动机一般可以不作防电晕处理，额定电压为10kV及以上的感应电动机定子绕组则必须进行防电晕处理。高原地区用的电机在额定电压6kV时也必须进行防电晕处理。

采用模压工艺成型的感应电机定子线圈大多应用一次成型防电晕结构。因为这种防电晕结构的防电晕层的耐磨损性较好，电阻值比较稳定，对环境污染小。用于一次成型防电晕结构的材料为全固化低电阻玻璃丝带或全固化低电阻涤纶纸带以及全固化含碳化硅高电阻带。涂漆型防电晕结构已基本被淘汰。

采用定子整浸工艺的感应电机定子线圈对防电晕材料的要求比较特殊。除了对防电晕带的常规性能如厚度、抗拉强度、电阻率有要求外，还要求有一定的透气性，以利于定子线圈在VPI过程中的透气和渗漆。但目前国内尚未将此要求订入标准。另外整浸定子用低电阻防电晕带要求的电阻率也比用于模压绝缘的要低些，这是考虑到浸渍过程会有很多浸渍树脂渗入低电阻防电晕层中，使电阻值增高，表1.5-14列出国内两种防电晕带的主要技术条件。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.5-14 模压用和整浸用防电晕带主要技术条件

类 别	厚度 (mm)	带子标重 (g/m^2)	拉伸强度 (N/cm)	表面电阻率 (Ω/口)
模压用低阻带	0.08±0.02	120±40	≥60	2×10^2～1×10^4
模压用高阻带	0.19±0.03	280±50	≥80	1×10^8～5×10^9
整浸用低阻带	0.08±0.03	75±12	≥60	3×10^2～3×10^3

选用整浸用防电晕材料时，必须进行“相容性”试验，检验防电晕材料是否与浸渍树脂相容。例如用浸渍树脂浸泡后，防电晕材料上的导电颗粒是否会脱落，电阻值有无变化，对浸渍树脂的性能和黏度有无影响等。

高压感应电机定子线圈防电结构主要与电机的额定电压有关。额定电压较低时（如 $U_N \leqslant 6kV$）时，可以只作槽部防电晕处理。当电机的额定电压为 $6kV < U_N \leqslant 13.8kV$ 时则必须采取二级或三级防电晕处理。典型的 10kV 的电机圈式定子线圈的防电晕结构如图 1.5-18 所示。

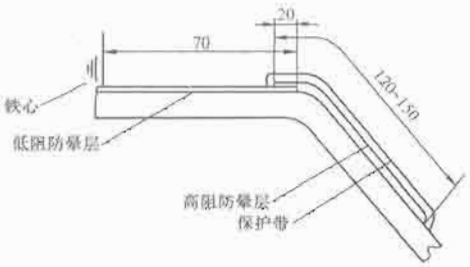


图 1.5-18 10kV 圈式定子线圈防晕结构

3.1.4 绕组连接件绝缘及放电间隙

感应电机定子绕组的连接件包括相内连接线、极间连接线、引出线等，此外还有绕组端部固定件，如端箍支架等需要绝缘。

相内连接线和极间连接线位于绕组端部，不直接与接地件接触，其绝缘强度要求不像定子线圈那么高。特别是相内连接线，相连两端的电压差较小，其绝缘包扎层数可较小（相当于线圈端部云母带层数）。但相内连接线要处理好与线圈引线处的绝缘搭接。线圈引线的绝缘包扎末端要包成锥体形，锥体长度一般不小于 10mm（6kV 级以下）或 15mm（7kV 级以上）。锥体处要露出云母带层，不要包保护带。线圈引线接头处铜线焊接后要去除铜线尖角和炭黑等杂质，最好在接头处包一层薄的涤纶毡。因为这样既可减少接头处铜线棱角损伤云母带，又可使接头处绝缘在定子浸渍时吸满胶，使绝缘密实，利于散热。包扎相内连接线的云母带通常采用薄膜和玻璃布双面补强的“三合一”粉云母带，云母带的厚度可以厚一点，以提高云母带的机械强度。极间连接线的绝缘结构基本同相内连接线，但包扎云母带的层数略多些。极间连接线为了固定，有时与相内连接线绑在一起，这时它们之间应垫一层涤纶毡或绝缘板。当 10kV 及以上电压的极间连接线绑在一起时，极间连接线之间至少要 13mm 的间隙。

感应电机定子绕组的引出线可分为电缆式结构和铜排式结构。所谓电缆式结构是指使用电机绕组引接电缆来作引出线。它为大多数感应电机所采用。而铜排式结构则是用铜排包上绝缘后作引出线。少数大容量电机采用。

目前国内应用较多的高压电机绕组引接电缆主要有：连续运行导体最高温度为 90℃的铜芯乙丙橡皮绝缘氯磺化聚乙烯护套电机绕组引接电缆（型号 JEH）、铜芯乙丙橡皮绝缘氯醚护套电机绕组引接电缆（型号 JEM）；连续运行导体最高温度为 180℃的铜芯硅橡胶绝缘电机绕组引接电缆（型号 JG）和硅橡胶绝缘高压电机引接线（型号 JGG）等。其中 JEH 和 JEM 常用于 F 级电机中，有 500V、1000V、3000V、6000V 和 10000V 等电压等级。JG 和 JGG 可用于 F 级和 H 级电机中。JG 的额定电压有 500V、1000V，JGG 的额定电压有 6000V 和 10000V。上述引接电缆基本满足了国内交流电机的需求，但也都存在一些不足。例如，乙丙橡皮绝缘类引接电缆的导体最高温度为 90℃，这与 F 级电机的导体最高工作温度 105℃的要求尚有一定差距；另外，乙丙橡皮绝缘的耐溶剂性不好，将其用于整浸型交流电机时，通常都必须采取整浸后接引接电缆的方式。而硅橡胶绝缘引接电缆也因价格昂贵，影响了其使用范围。

针对上述问题，国内近年研制成一种 JYJ 系列铜芯辐照聚烯烃绝缘电机绕组引接线。这种引接线的长期工作温度可达 105℃、125℃或 150℃，因此可满足不同耐热等级电机的要求。此外，这种引接线耐溶剂性好，浸渍后烘焙时绝缘不胀不裂，可在定子整浸前接线。

交流电机定子端箍分金属端箍、玻璃钢端箍以及软端箍等。金属端箍由非磁性钢制成，外面包绕云母带等绝缘材料。端箍与线圈接触的一面最好垫一层涤纶毡，并用玻璃丝带扎紧。这样当线圈靠到端箍上会“陷”入涤纶毡中，在定子整浸后涤纶毡浸漆固化变硬，卡住线圈，有利于绕组端部固定。软端箍是一种不固定的端箍，它由玻璃丝束和涤纶毡等组成圆柱状软绳。使用时将软端箍围在定子绕组鼻部外侧或内侧成圆环状，并与绕组端部线圈绑扎固定。定子整浸后软端箍变成刚性端箍。软端箍一般用于容量较小的交流电机中。但近来有一种软端箍是放置在定子绕组端部线圈上下线圈边之间的，这种电机同时还有固定式端箍。软端箍只适用于定子整浸的电机中。

上述介绍的相内连接线、极间连接线以及端箍的绝缘结构和工艺适用于定子整浸的电机。对于不是定子整浸的电机，在包扎云母带时要包一层云母带，在云母带层外面涂刷一次室温固化的无溶剂环氧树脂，或者先把一段包扎用云母带浸过室温固化无溶剂环氧树脂，然后再包绕。绝缘中有用涤纶毡的，也需把涤纶毡浸过环氧树脂后再用，或在定子线圈嵌入定子铁心槽中后，在外面给涤纶毡注胶或涂胶。

感应电机定子绕组是带电体。在定子绕组端部的绝缘表面常常存在高电位，特别是在定子绕组进行耐电压试验以及遇到过电压侵袭时，绕组端部表面的电位会更高。为了防止定子绕组端部对相邻部件以及接地部件之间的放电或爬电，它们之间应该有一定的间隙和爬电距离。图 1.5-19 和表 1.5-15 列出定子绕组端部的放电间隙和爬电距离，供使用参考。

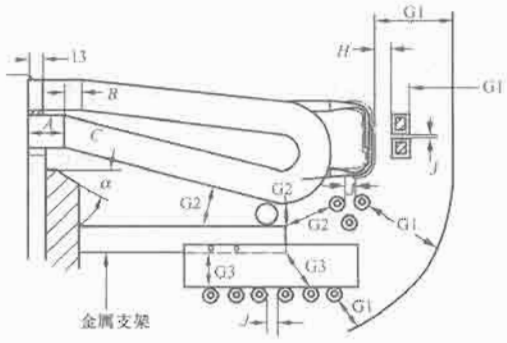


图 1.5-19 定子绕组端部间隙示意图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.5-15 定子绕组端部的爬电距离和间隙

额定电压（V）	绕组端部的爬电距离和间隙（mm）								
—	A	B	C		G1	G2	G3	H	J
—	—	—	绕包	卷包	—	—	—	—	—
0～900	25	7	3.2	7	13	7	13	0	0
901～3000	25	7	3.2	13	13	7	16	0	0
3001～5000	38	13	4.8	20	13	13	25	0	0
5001～7000	50	13	6.5	25	20	20	32	0	0
7001～11500	50	25	8.0	—	25	32	50	13	13
11501～14500	50	25	9.5	—	40	45	75	17	17

注 1. G1 是到扁平的金属部件例如挡风板之间的间隙，如挡风板等为非金属部件，则 G1 值可减小一半。

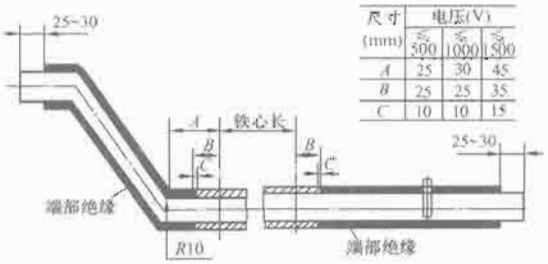
2. G2 是到有尖角的金属部件如端箍支架或挡风板上的螺栓之间的间隙。

3. G3 是引出线或并联环沿层压板固定支架或夹板的表面到金属不见如端箍支架之间的爬电距离。

3.2 转子绕组绝缘结构

感应电机的转子结构，按绕组型式可分为笼型和绕线型两类。其中笼型转子绕组有铸铝或裸铜（铝）条等组成，不需绝缘。绕线型转子绕组分散嵌式绕组和插入式线棒绕组两种，前者用于小型电机，后者用于大、中型电机。

散嵌式转子绕组的绝缘结构与低压电机定子绕组的相似。插入式线棒绕组的线棒大多数采用裸导条。导条的一端先弯成端部形状，然后将线棒的槽部和端部进行绝缘。通常槽部热滚卷包环氧薄膜玻璃粉云母箔，经冷压或热烘压使绝缘固化成型；或槽部用环氧玻璃粉云母带绕包，用热模压使绝缘固化成型，然后包端部绝缘。在槽口伸出段槽部绝缘和端部绝缘的搭接有正锥体和倒锥体两种型式。正锥体搭接是槽部绝缘搭接锥体随绝缘厚度增加而向槽口靠近，而倒锥体则是槽部搭接锥体随绝缘厚度增加而逐渐离开槽口。倒锥体接缝可使爬电距离延长约 1 倍，但要先包端部绝缘，后包槽部绝缘。绝缘搭接锥体的长度以及搭接锥体离转子铁心槽口的距离与转子绕组的额定电压有关。图 1.5-20 所示为插入式线棒绝缘结构图，图中同时标出不同电压下绝缘搭接锥体的长度和离槽口的距离。对 3000V 转子绕组的插入式线棒，其端部绝缘搭接处距铁心齿压板、压指的距离应不小于 15mm。



尺寸 (mm)	电压(V) ≤500	≤1000	≤3500
A	25	30	45
B	25	25	35
C	10	10	15

图 1.5-20 插入式线棒绝缘结构

转子绕组的端部绝缘包括并头绝缘、层间绝缘、支架绝缘、相间连接线绝缘和引出线绝缘等。中型电机转子绕组槽部装配图如图 1.5-21 所示，端部绝缘结构型式如图 1.5-22 所示。转子绕组的集电环是裸露型的，集电环之间及集电环与接地的金属套筒或转轴之间应有足够的爬电距离（见表 1.5-16）。此外，为了提高爬电电压，在转子绕组的端部表面及集电环间、集电环与转轴间等处应涂敷表面光亮的防护漆或用环氧树脂涂封。

表 1.5-16 集电环对地及环间爬电距离

转子额定电压(V)	500，1000	1500，2000	3000
爬电距离（mm）	15	25	40

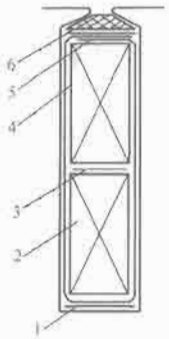


图 1.5-21 插入式线棒绕组槽部绝缘
1—槽底垫条；2—导条及绝缘；3—层间垫条；4—槽衬；5—楔下垫条；6—槽楔

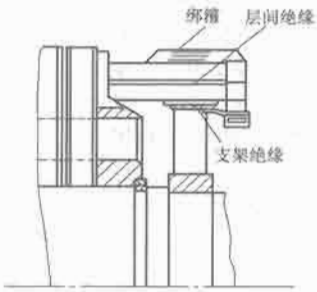


图 1.5-22 转子绕组端部绝缘结构型式

3.3 定子线圈和绕组绝缘工艺

感应电机定子线圈和绕组绝缘按绝缘成型工艺可分为模压工艺和 VPI 工艺两种。因为感应电机的定子线圈大多为圈式线圈，线圈尺寸也相对较小，所以感应电机定子绕组的 VPI 工艺基本都是定子绕组整体 VPI 工艺。其 VPI 工艺过程基本同 2.3.3 节。感应电机定子线圈的模压工艺与同步电机也略有不同。同步电机的定子条式线棒模压时是槽部和端部同时进行热模压使绝缘固化成型，模压时间相对较长，下线后不再进行加热固化。感应电机定子线圈因下线时有“吊把”要求，线圈鼻部绝缘要有一定柔韧性。同时因圈式线圈端部形状较复杂，带端部的模具制造难度大，所以感应电机定子线圈模压大多仅为线圈直线部位热模压成型，线圈转角部位和邻近端部靠余热达到半固化或胶化状态。为了使这种模压线圈的端部和鼻部绝缘固化成型，通常把下线后的定子进行普通浸漆处理或进行 VPI 处理，然后进烘炉烘焙。这样，既可使线圈绝缘完全固化，又可使绕组固定得到加强。

3.4 转子线圈和绕组绝缘工艺

感应电机转子插入式线棒不管采用槽部卷包绝缘还是绕包绝缘，其端部绝缘在下线时是不固化的，以便下线后弯线圈端部不至于损伤绝缘。为此，转子绕组在接线后需进行浸漆处理，以使绕组端部绝缘固化，并提高转子绕组的固定，改善散热条件。高速感应电机转子浸漆后最好采用旋转烘焙，以使转子绕组沿圆周各个方向的含漆量均匀，也有利于

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

转子的动平衡。

4 直流电机绝缘

直流电机绝缘包括电枢绝缘：电枢线圈和绕组绝缘、换向器绝缘；定子绝缘：主极绝缘、换向极绝缘、补偿绕组绝缘等；其他部分绝缘：电刷装置绝缘、出线装置绝缘和轴承座绝缘等。

4.1 电枢线圈和绕组绝缘结构

电枢线圈和绕组绝缘包括匝间绝缘、层间绝缘、对地绝缘以及端部绝缘、支架绝缘、绑扎绝缘等。

直流电机正常运行时，电枢绕组的匝间绝缘承受换向片间的最高电压，牵引电动机还要承受由于滑动接触时火花引起的瞬态脉冲过电压。中小型电机一般用电磁线上的漆膜或双玻璃丝绝缘作匝间绝缘，大型电机则需包绕绝缘薄膜或云母带（三合一粉云母带）来作匝间绝缘。此外在线圈的槽口和鼻端弯曲处常加绝缘垫片（如聚芳纤维纸与聚酯薄膜复合而成的NMN）或玻璃丝套管来加强绝缘。

层间绝缘是指同一槽内线圈上层边和下层边之间的绝缘，或者是蛙绕线圈中的叠绕和波绕线圈边之间的绝缘。层间绝缘承受电机的额定电压。散嵌线圈可按额定电压考虑绝缘强度。成型线圈中的叠绕、波绕线圈上下层间，双鼻蛙绕组线圈中叠绕、波绕线圈之间也按额定电压考虑。单鼻或异槽式蛙绕线圈的上下相邻叠绕、波绕线圈边处于等电位，其层间绝缘强度可按匝间绝缘考虑。大中型电机多在层间另加绝缘衬垫，起机械保护作用。

电枢绕组对地绝缘结构既与电机的额定电压有关，也与电机的额定容量有关。在采用散嵌线圈的小型直流电机中，槽衬即是电枢绕组的对地绝缘。采用成型线圈的中型直流电机，其电枢绕组的对地绝缘分两种。当电枢线圈由双玻璃丝包线或玻璃丝包漆包线绕制而成时，线圈要绕包或卷包对地绝缘，槽内有时还加槽衬绝缘；当电枢线圈由薄膜绕包线或聚酰亚胺薄膜烧结线绕制而成时，线圈可不包绕对地绝缘，而直接用槽衬绝缘作对地绝缘。而采用成型线圈的大型直流电机，则通常是在线圈上包绕对地绝缘，槽内不再使用槽衬（特别是采用VPI工艺时）。使用槽衬绝缘时，槽衬应伸出电枢铁心每端（15～25）mm。电枢线圈端部的对地绝缘比槽部可以薄一些。对散嵌线圈的端部通常不用对地绝缘。中大型电机的成型线圈端部一般用薄膜带或三合一粉云母带绕包，绕包层数相当于槽部的1/2到2/3。

电枢绕组使用的对地绝缘材料，B级主要有：聚酯纤维聚酯薄膜复合箔DMD、环氧玻璃聚酯薄膜粉云母箔（又称三合一粉云母箔）、环氧玻璃粉云母带5438-1、聚酯薄膜等；F级主要有：聚芳酰胺纤维纸Nomex、聚芳酰胺纤维纸与聚酯薄膜复合箔NMN、环氧玻璃聚酯薄膜粉云母箔和带、桐马环氧玻璃粉云母带5445-1、聚酰亚胺薄膜等；H级主要有：Nomex、聚酰亚胺薄膜、聚芳酰胺纤维纸与聚酰亚胺薄膜复合箔NHN等。

直流电机电枢绕组在下线并连接后需进行普通浸漆处理或真空压力浸渍处理。

直流电机电枢是旋转体。由于旋转时离心力的作用，电枢绕组会产生离心倾向。通常槽部用槽楔来控制绕组的离心作用，端部则用无纬玻璃丝绑扎带直接在绕组端部绕制成的玻璃钢端箍来限制。近年来，很多大型直流电机干脆取消槽部槽楔，而改用无纬玻璃丝绑扎带直接绕在槽部线圈表面，绑扎带固化后变成强度很大的玻璃钢环。

电枢直径在200mm及以下的直流电机，因为绕组端部较短，一般在电枢铁心端部不设支架。电枢铁心直径大于200mm时，则应设端部支架，并使电枢绕组端部绑扎在电枢端部支架上。支架绝缘一般分为垫放式支架绝缘和绕包式支架绝缘两种。普通垫放式支架绝缘为在金属支架上垫放云母板、玻璃布层压板、Nomex纸或其复合制品等。有的大型直流电机则采用Ⅱ型玻璃纤维压制件扣放在支架上；绕包式支架绝缘是在金属支架上绕包云母带、绝缘薄膜等柔软绝缘材料，使整个支架都包裹在绝缘中。这种绝缘结构的支架有较大的爬电电压，应用较广。

4.2 换向器绝缘结构

换向器绝缘包括换向片片间绝缘、换向片对地绝缘和换向器两端面涂封绝缘等。因为换向器在电机运行时，既要传导电流，又要承受离心力和热应力的作用，换向片等部件处于裸露状态，因此对换向器绝缘提出一些特殊要求。

换向片片间绝缘要求厚度均匀，具有一定的弹性，在高温高压作用下具有较小的收缩率。换向器装配时不应有太多的胶黏剂流出来。硬度适宜，最好与换向片有相近的磨损率。换向器云母板基本具有以上特性：云母含量高达90%以上，在压强60MPa和温度160℃下，云母板边缘无胶黏剂挤出；在压强60MPa下，常温收缩率不大于9%，160℃下收缩率不大于2.5%。换向器云母板有片云母板和粉云母板两种。两种云母板都在直流电机上使用。

V形绝缘环是拱形换向器中换向片与压圈之间的对地绝缘。V形绝缘环需先压型，一般用塑型云母板或上胶玻璃布加聚酯薄膜等压制而成。换向片与套筒间如果间隙较大，可不用绝缘。否则用柔软片云母板卷成筒状作换向片与套筒间的对地绝缘。

V形绝缘环伸出换向片的两端面应用环氧树脂或室温硫化硅橡胶进行涂封。换向器各带电体对地的爬电距离一般不得小于20mm，大型电机不得小于40mm。

4.3 主极绝缘结构

直流电机主极绝缘可分为主极线圈绝缘和主极极身绝缘。主极中的并、他励绕组通常匝数较多，承受的电压较低，在电机正常运行时匝间电压不大。但当励磁回路突然断开时，由于其匝数多，将受到很高的电压，特别是由整流电源供电时电压中有高频分量。高频冲击电压在励磁线圈匝间的分布很不均匀，其首末几匝的匝间电压较高。为此，线圈首末几匝的匝间绝缘应予加强。小型电机的并、他励线圈，一般用漆包线绕制。中大型电机则大多用漆包扁线、玻璃丝包扁线或玻璃丝包漆包扁线绕制，其电磁线的绝缘即为线圈的匝间和层间绝缘，但在线圈圆角处需适当加强绝缘。

串励线圈一般匝数较少，部分小型电机的串励线圈常用漆包圆线、扁线或双玻璃丝包扁线绕制，其层间、匝间不需另加绝缘。当用裸铜线扁绕时，需垫入或绕包匝间绝缘。

主极极身绝缘是励磁线圈与主极铁心间的对地绝缘，其绝缘强度应按励磁电压考虑；当带有串励线圈时，其绝缘强度应按电机的额定电压考虑。

主极极身绝缘按结构和工艺不同可分为多种型式。如框架式（直绕式）、绕包式、垫块式、扁绕式等。框架式极身绝缘一般是用金属或塑料制成框架，再在框内卷包云母箔或绝缘薄膜与纤维纸复合箔，然后直接在极身绝缘上缠绕主极线圈，所以又叫直绕式。一般主极铁心长度小于500mm，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

可采用直绕式结构。绕包式、扁绕式和垫块式都是先单独绕制好主极线圈，包好极身绝缘，然后将线圈套在主极上。其中扁绕式主极线圈的对地绝缘主要是包绕在线圈上，而垫块式极身绝缘主要适用于有多个励磁绕组的主极。绕包式极身绝缘应用较多，其极身绝缘以绝缘薄膜与纤维纸复合箔（如DMD、NMN、NHN）卷绕为主。有些大型直流电机的主极极身绝缘类似于同步电机的磁极，采用玻璃布层压板作极身绝缘，层压板接缝的四角用NMN补强。也有采用上胶玻璃丝压制成U形的成型极身绝缘件的。

4.4 换向极绝缘结构

换向极的线圈和极身绝缘与主极的基本相同。换向极线圈绝缘结构中，只有部分小型直流电机的换向极线圈用漆包线或玻璃丝包线绕制，电磁线的绝缘层即为线圈的匝间和层间绝缘；其余的基本上采用裸铜（铝）扁线扁绕而成，然后垫以匝间绝缘，热压成型；当定子空间位置较大时，常用绝缘垫块作匝间绝缘，使线匝架空，以利于通风散热，如图1.5-23所示。换向极线圈的首末匝需加强绝缘。

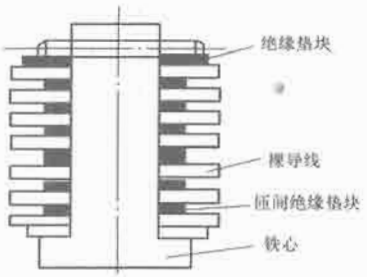


图1.5-23 线匝架空的换向极线圈

4.5 补偿线圈绝缘结构

补偿线圈有菱形、同心式和条式三种。小型电机常用菱形补偿线圈，中型电机大多数采用同心式补偿线圈，部分采用条式补偿线圈，大型电机采用条式补偿线圈。

菱形和同心式补偿线圈用电磁线绕制，线圈和槽部绝缘结构与散嵌式电枢线圈的基本相同。电磁线绝缘层即为线圈的匝间绝缘，用槽衬绝缘作为对地绝缘。条式补偿线圈直线部分的绝缘与成型电枢线圈直线部分绝缘基本相同，在裸铜排外面绕包或卷包绝缘作为对地绝缘，槽衬绝缘作机械保护作用；条式补偿线圈的端部连接线也是由裸铜排制成。当端线连接相距较近时，常绕包或衬垫匝间绝缘；端线连接相距较大时，常用绝缘垫块间隔架空。

4.6 直流电机绝缘工艺

直流电机属低压电机，其绝缘问题最主要的是如何提高绝缘的耐热老化性能，改善绝缘的耐潮和耐环境污染能力，而解决这些问题的最有效的方法是进行浸漆处理。直流电机浸漆范围过去主要限于电枢，现在已逐渐扩大到主极，甚至换向极也浸漆。常用的浸漆方法主要有滴浸法、沉浸法、滚浸法和真空压力浸漆法等四种。

滴浸法主要用于小型直流电机电枢的浸漆；沉浸法用于一般中小型直流电机电枢等；滚浸法适用于大型直流电机电枢。真空压力浸漆法可以使绝缘和铁心都得到充分浸渍，浸漆效果优于其他浸漆方法，因此得到越来越广泛的应用。特别是采用无溶剂浸渍树脂时，经真空压力浸渍处理的绝缘绕组不仅绝缘性能好，而且绕组与铁心黏结成整体，极大地改善了绕组的散热效果，提高了绕组防潮防污染的能力。目前国内用于真空压力浸渍的无溶剂浸渍树脂见表1.5-21。

5 低压电机绝缘

低压电机通常是指额定电压为500V及以下的三相、单相发电机或电动机，包括感应电机、直流电机和同步电机。低压电机的绝缘结构包括导线绝缘、匝间绝缘、层间绝缘、相间绝缘、对地绝缘和固定支架绝缘等。

5.1 定子绕组绝缘结构

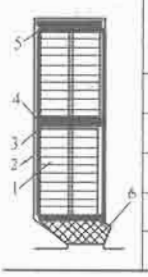
电机正常运行时匝间电压很低，但操作过电压可能较高。散嵌绕组一般用漆包圆线，对于频繁起动及正反转电机宜选用玻璃丝包漆包线，以提高匝间绝缘的机械强度和介电强度。分片嵌绕组常用漆包扁线，截面积大的宜选用双玻璃丝包扁线，以提高机械强度。对采用变频器供电的变频调速电机，因电压中含反复出现的冲击电压成分，其匝间绝缘也应加强。绕组线可采用含耐电晕漆包涂层的三层漆包电磁线。

低压电机的槽绝缘和绕组端部对支架的绝缘为对地绝缘，承受相电压，宜选用DMD、NMN、NHN等复合材料。这是因为这些复合材料的机械和电气性能好，柔软易弯曲，便于衬贴于槽壁。槽绝缘两端伸出槽口的长度和形式见表1.5-17。微特电机也有用熔敷粉末喷涂铁心槽壁作为对地绝缘的。分片绕组和散嵌绕组的槽部绝缘结构分别见表1.5-18和表1.5-19。

表1.5-17 槽绝缘伸出槽口型式

示意图	 (a) 出槽口处不加强	 (b) 出槽口处折转加强	 (c) 出槽口处折转并进入槽内	
电机中心高 H(mm)	30～112	132～180	200～280	315～355
槽绝缘厚度 d(mm)	0.22～0.25	0.30～0.35	0.35～0.40	0.45～0.50
每端伸出槽口长度 l(mm)	7.5～10	7.5～10	10～15	15～20

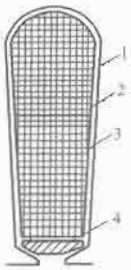
表1.5-18 分片嵌绕组槽部绝缘结构举例 单位：mm

示意图	项号	名称	宽度	高度	每端伸出长度
	1	电磁线、松胀量、公差	$2b+0.2$	$(a+0.1)\times n$	
	2	贴胶纸分片	0.2	0.4	
	3	槽绝缘	0.45×2	0.45×3	15
	4	层间垫条		2	43
	5	槽底垫条		0.5～1	18
	6	槽楔		3～4	12.5

注 a、b—电磁扁线的厚度和宽度；n—沿槽高方向的导线总根数。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.5-19 散嵌双层绕组槽部绝缘结构举例

示意图	项号	名称	E 级	B 级	F 级	H 级
	1	槽绝缘	聚酯薄膜绝缘纸复合箔 6520	DMD	NMN	NHN
	2	层间绝缘	同上	同上	同上	同上
	3	电磁线	QZ-2	QZ-2 或 QZY-2	QZY-2 或 QZY/QXY	QZY/QXY
	4	槽楔	桐油处理竹楔	聚酯玻璃纤维件	3240 玻璃布层压板	二甲醚玻璃布层压板

5.2 转子绕组绝缘结构

转子绕组绝缘结构见 3.2 节。

5.3 低压电机绝缘工艺

低压电机的定子绕组和转子绕组（绕线型转子）不管是散嵌绕组还是分片嵌绕组基本都属于后浸渍型绝缘绕组，对它们来说绝缘处理十分重要。所谓绝缘处理是指用绝缘漆浸渍填充绕组绝缘层和覆盖表面。

绕组绝缘处理的目的是：

1）提高耐潮性。大多数绝缘在潮湿空气中都将不同程度地吸收潮气，从而引起绝缘性能恶化。绝缘经浸漆并干燥固化后，就能将绝缘的气孔填满，并在表面形成光滑致密的漆膜，可提高绝缘防潮和防其他介质侵入的能力。

2）减缓绝缘老化速度，提高导热性能和散热效果。由于绝缘结构表面形成的漆膜使空气中的氧和潮气等不易侵入绝缘内部，可延缓老化过程，从而延长绝缘结构的使用寿命。绝缘漆的热导率约为空气的 5 倍，用漆填充空气隙后能改善绝缘结构的导热性能，提高散热效果。

3）提高绝缘的电气性能和机械性能。绝缘漆的介电性能远高于空气，经绝缘处理后，绕组黏结成一个整体，既提高了绕组的介电性能，又可避免或减小由于电磁力、振动和热胀冷缩引起的绝缘松动和磨损。

4）提高绝缘的化学稳定性。绕组绝缘处理后漆膜能防止绝缘直接与有害的化学物质接触而损害绝缘性能。经过特殊绝缘处理，还能使绕组绝缘具有防霉，防油污等能力。

5.3.1 绝缘漆和浸渍方法的选用

为了保证绕组绝缘处理的质量要根据电机不同的技术要求分别选择合适的绝缘漆（浸渍漆、表面的覆盖漆）和浸渍方法。

电机用的浸渍漆分有溶剂和无溶剂两类。前者具有渗透性好、储存期长、使用方便等特点。但一般需多次浸漆，工艺时间较长，溶剂挥发可能在绝缘内留下空隙，还造成浪费和环境污染。后者的特点是黏度随温度变化较快，活性稀释剂（如果有的话）在固化过程中能与漆中的基体产生反应，不会挥发出去，因而绝缘的整体性好，并可改善绝缘结构的导热和耐热性能。

对有溶剂浸渍漆的主要要求为：①合适的黏度和高的固体含量、良好的渗透性、挂漆量多；②厚层固化性好、黏结力强、毒性低、较长的储存期、工艺方便，与其他绝缘材料有良好的相容性。

对无溶剂浸渍漆（无溶剂浸渍树脂）的主要要求为：①黏度小，以保证浸透绝缘。为达到此目的，通常无溶剂浸渍树脂中加有活性稀释剂，活性稀释剂在固化时能参加反应。也有无溶剂浸渍树脂中不加活性稀释剂的，而是通过提高浸渍树脂的温度降低黏度，通常无溶剂浸渍树脂的黏度不大于 100mPa·s，高压电机的不大于 50mPa·s。②有合适的胶化温度和时间。为防止浸渍树脂在烘焙时从绝缘中流失，希望绝缘层表面的浸渍树脂在烘焙开始时尽快胶化，为此要求浸渍树脂的胶化时间短些。但胶化时间缩短必然导致浸渍树脂储存期也相应缩短。因此，浸渍树脂的胶化时间既不能过短也不能过长。一般 130℃下浸渍树脂的胶化时间为 30min 左右。③长的储存期。大多数电机厂真空压力浸渍设备使用无溶剂浸渍树脂的数量都较大，从几吨到几十吨的都有。这么多浸渍树脂不仅价值可观，而且万一报废了还不好处理。因此无溶剂浸渍树脂的储存期应足够长，通常要求在室温下储存期不低于 1 年。④高的耐热性。近几年来各种电机特别是电动机的绝缘耐热等级大多采用 F 级，要求采用 H 级耐热等级的电机也逐渐多起来，这就使得无溶剂浸渍树脂的耐热等级大多立足 F 级，还有一些为 F—H 级通用。⑤优良的机电性能。浸渍树脂应该有很高的黏结强度，绝缘固化后的机械性能和介电性能优良。20 世纪五六十年代环氧无溶剂浸渍树脂大多使用胺类作固化剂，其热态介质损耗因数普遍较大。20 世纪 70 年代以后改用酸酐作固化剂，其冷热态介质损耗因数都有所降低。

常用的浸渍方法见表 1.5-20，电机绕组常用浸渍漆和浸渍树脂见表 1.5-21。

表 1.5-20 电机绕组常用浸渍方法

名称	工艺要点	一般适用范围
沉浸	工件沉入漆液内，利用漆液压力和绕组绝缘毛细管作用，达到漆的渗透和填充	中、小型电机
真空压力浸渍	在密封容器中利用真空排除绕组内层空气、潮气和挥发物，输漆后在液面上加 0.2～0.7MPa 压力	要求质量高的中、小型电机；采用整体浸渍工艺的高压电机
滴浸	绕组加热并旋转，滴在绕组端部的漆在重力、毛细管和离心力作用下，均匀渗入绕组内部及槽内	小型电机
滚浸	绝缘漆浸没一部分绕组，滚动铁心使绕组端部和槽内间隙均浸透并填充	大、中型电机
浇浸	使绕组受漆充分而均匀	大、中型电机
喷漆	黏度适当，使绕组表面受漆充分利用	绕组表面覆盖

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.5-21 电机绕组常用浸渍漆和浸渍树脂

耐热等级	名称型号	特点
B	三聚氰胺醇酸浸渍漆 1032	较好的耐油性、内干性，漆膜平滑有光泽
B	环氧酯浸渍漆 1033	耐油耐潮性优良、黏结力强
F	环氧漆浸树脂 1146	耐热性高，电性能力学性能优良，固化速度快
F	不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂 9110 或 H9110	电性能和力学性能好，耐水耐油，固化速度快，储存期长
F	环氧无溶剂浸渍树脂 9105（SD1149）	黏结力强、介电强度高，储存期长，热态介损大
F	环氧无溶剂浸渍树脂 ET884	电性能优良，不含活性稀释剂，加热浸渍
H	二苯醚无溶剂浸渍树脂 1150	电性能力学性能好，固化较快，储存稳定性好
H	不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂 H9150	电性能好，固化速度快，储存期长
200	改性二苯醚无溶剂浸渍树脂 1160、1161	耐高温、附着性好、固化温度较低
220	改性耐高温不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂 H9161	良好的电性能、耐热性、固化温度低、储存期长

5.3.2 浸漆工艺要点

浸漆工艺主要包括预烘、浸漆和干燥三个过程，其工艺参数主要与浸渍漆的性能有关。

预烘的目的在于使工件加热，驱除分布在绝缘结构内的潮气和低分子挥发物，以利于绝缘漆的渗透。预烘温度可根据潮气和低分子挥发物的蒸发温度以及绝缘结构允许的最高温度等决定。预烘时，须定时测量工件的绝缘电阻，预烘时间以绝缘电阻值达到连续 3h 都稳定为止。

浸漆的质量决定于浸漆时工件的温度、漆的黏度和浸漆时间等。浸漆的次数根据电机对使用环境条件的要求、电机的绝缘结构以及选用的浸渍漆的性能而定。浸漆时工件的温度一般以 50～70℃为宜。温度过高会使漆槽内的浸渍漆发生聚合变质。各次浸漆对漆的黏度和浸漆时间的要求有所不同：第一次浸漆时的黏度宜小一些，浸渍时间宜长一些，以便使工件浸透；第二次及其后的浸漆的主要目的在于覆盖首次浸漆干燥时在绝缘上留下的微孔并加厚表面漆膜，使工件表面形成完整的漆膜，提高绝缘可靠性，因此漆的黏度可稍大一些，浸渍时间应比第一次短。多次浸漆时，在每次浸漆后应有适当的干燥过程，使前后两次的漆膜既不分层，又不致使前次漆膜被溶蚀。

干燥一般可分为两个阶段进行：第一阶段主要是使浸渍漆中的溶剂挥发。这时温度应控制在高于溶剂的挥发温度，但不得超过其沸点以防止起泡。第二阶段主要是使漆固化，并在工件表面形成坚硬的漆膜。为此，干燥温度一般宜控制在高于工件绝缘等级温度约 10℃（20 世纪 90 年代开发了几种快干漆，干燥温度可降低，干燥时间也可缩短）。升温速度视浸渍漆而异，一般约为每小时 20℃。干燥的时间长短与浸渍工件的大小、浸渍漆性能、干燥温度的高低以及加热方式等有关。干燥过程中须定时测量工件的绝缘电阻。干燥好了的标志是绝缘电阻值连续 3h 都稳定在相同值上。

5.3.3 沉浸工艺

沉浸工艺是将绕组预烘后沉浸入有溶剂漆或无溶剂漆的槽内，利用漆液的压差把漆渗透入绕组绝缘结构内部。漆液表面至少高出工件 200mm。

表 1.5-22 低压小电机定子绕组（B 级）沉浸 1032 漆工艺

工序名称	温度（℃）	时间（h）	热态绝缘电阻（MΩ）
预烘	130	4～9	≥50
第一次浸漆①	50～70	直至无气泡约 0.25	
滴漆	室温	约 0.5	
烘干	130	8～15	≥10
第二次浸漆②	50～70	0.20～0.25	
滴漆	室温	约 0.5	
烘干	130	11～20	≥1，变化小于 10%

① 浸渍漆黏度（22～30）s［4 号黏度计，（20±1）℃］。

② 浸渍漆黏度（35～40）s［4 号黏度计，（20±1）℃］。

预烘可在烘炉或真空烘炉内进行。真空烘炉预热时可取较低的预烘温度并能缩短预烘时间，效果较好。因为根据水的饱和蒸汽压与温度的关系曲线可知，当真空度为 8000Pa 时，水的沸腾温度为 41℃；而当真空度为 1000Pa 时，水的沸腾温度则仅为 7℃。也就是说，在真空条件下，水更容易沸腾。而且由于真空造成绝缘内外的压力差，而更容易将绝缘内的水分排除出去。但在真空预烘过程中应中断真空数次，使空气进入烘炉内，使工件能升到足够温度，促使绝缘中的挥发物挥发，以利于将其彻底排除出去。

一般用电机的浸漆次数，有溶剂漆为 2 次，无溶剂漆为 1 次。用于湿度高或有腐蚀性气氛环境下的电机应适当增加 1～2 次浸漆次数。浸漆工件的干燥一般在烘炉内进行。

表 1.5-22 为低压小型电机定子绕组沉浸三聚氰胺醇酸漆 1032 的常用工艺例子。

5.3.4 无溶剂浸渍漆滴浸工艺

采用快干无溶剂漆滴浸工艺能缩短浸渍和烘焙周期，减少材料和热量消耗，减轻劳动强度，并便于实现生产自动化。

图 1.5-24 所示为电机定子进行滴浸的示意图。图中已嵌好线的定子用涨胎固定，其轴线与水平线成倾角 α，并不断旋转。用通电加热的方法预热绕组。无溶剂漆在绕组端部上方呈细流状滴下。漆接触到热的绕组后，黏度迅速下降，在漆的自身重力、旋转离心力和绕组毛细管效应的共同作用下，漆液很快渗入并填充绕组的匝间和槽绝缘中。滴浸完成

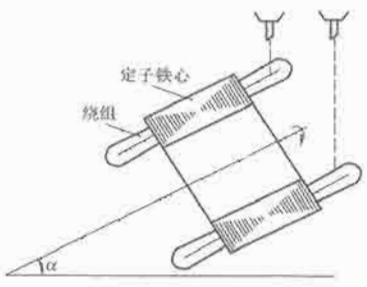


图 1.5-24 定子滴浸示意图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

后，立即将工件改变为水平旋转。此时漆尚有良好的流动性，在不断旋转和保持一定温度的情况下完成漆在定子绕组和槽绝缘中的渗透、填充和覆盖。然后提高温度进行“后处理”，使漆迅速聚合并固化，从而使绕组绝缘获得优良的机电性能。滴浸工艺过程中时间与温度的关系如图 1.5-25 所示。

滴浸工艺过程中各阶段的具体工艺参数与电机产品、绝缘漆及工艺装备有关。小型电机定子（中心高 160mm）滴浸转盘式自动线的工艺参数（滴浸漆为环氧聚酯快干无溶剂漆 1034）见表 1.5-23。

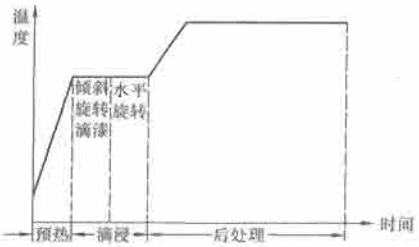


图 1.5-25 滴浸工艺时间与温度关系

表 1.5-23 小型电机定子滴浸 1034 漆的工艺参数

参数	预热	滴浸				后处理
	温度时间	温度时间	工件倾角 α	转速	流量	温度时间
	100～115℃ 4min	100～115℃ 8min	25°～35°	20～35r/min	30～200mL/min	150℃ 24min
选择参数要点	1. 保证工件均匀受热 2. 潮气及低分子物挥发 3. 达到滴浸所需温度	1. 保证绕组浸渍覆盖良好 2. 与浸渍漆的干燥性能相适应 3. 温度过高，会使漆提前胶凝，堵塞定子槽；过低，则漆难以进入槽中	1. 合理增大工件倾角，可缩短滴漆时间 2. 线径粗、铁心短、端部长、槽满率低的电机，倾角应小些	1. 保证绕组端部均匀受漆和槽中的填充 2. 转速太高，使铁心外圆沾漆、槽底与槽口部位受漆不均匀；太低，则使漆流失	1. 与定子绕组结构形状、几何尺寸有关 2. 流量太小，使线匝间和绕组端部含漆量小，填充渗透差，延长滴漆时间	1. 保证滴浸漆固化，获得优良的机电性能 2. 在不影响绝缘结构性能前提下，尽可能提高温度、缩短时间

5.3.5 真空压力浸渍工艺

真空压力浸渍工艺是当前最先进的一种浸漆工艺。它与前述两种浸漆工艺的根本区别在于其引进了真空阶段和压力浸渍阶段，这样就可以使绝缘中的水分、空气和低分子挥发物比较彻底地排除出去，还可以使浸渍漆或浸渍树脂充分渗透进绝缘层中并填充绝缘中的所有空隙，即使绝缘较厚也能浸透，从而使绝缘获得优良的性能。特别是采用无溶剂浸渍树脂的定子或转子整体真空压力浸渍（常称为“整浸”）工艺，不仅能使绕组绝缘的机电性能得到提高，绝缘厚度减薄，而且能极大地增强绕组固定、改善散热条件，提高绕组绝缘耐潮耐化学腐蚀的能力。

真空压力浸渍的工艺过程可见本章第 2.3.3 节。具体的工艺参数应根据电机绕组的额定电压、绝缘结构、绝缘处理要求、浸渍树脂或浸渍漆的性能等来综合考虑。

6 电机绝缘试验

这里所说的电机绝缘试验主要指电机绕组或绝缘件在制造过程中的检查试验和性能试验。

6.1 股间短路检查试验

条式线棒的导线，在换位编织并热压固化后，要进行股线间短路检查。短路检查一般用串联一个白炽灯泡的 36V（中容量电机）或 110V、220V（大容量电机）外施交流电压来进行。当发现有股间短路后，可按图 1.5-26 所示线路找出短路位置：合上开关，移动滑动触点 1。当检流计 7 指针指零时，滑动触点 1 所对应的位置就是股线短路点。

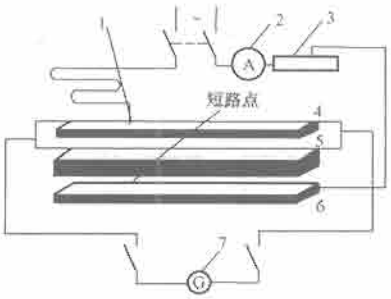


图 1.5-26 股间短路点测定示意图
1—滑动触点；2—直流电流表；3—滑线电阻；4—标准实心导线；5—被试空心导线；6—被试实心导线；7—检流计

6.2 定子线圈匝间耐冲击电压试验

圈式定子线圈匝间绝缘耐冲击电压试验原则上按 JB/T 10098—2000《交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平》执行，如试验电压应为利用电容器振荡放电产生的冲击电压，冲击电压的波前时间为 0.2μs，容差为(+0.3)/(−0.1)μs。试验时冲击电压施加在被试线圈的两引线端，每次冲击 5 次。样品线圈应具有的匝间绝缘耐冲击电压水平为 $0.65\times(4U_N+5)$kV。但 JB/T 10098—2000 对制造中的线圈的常规试验未订出具体标准，这就要求电机制造厂根据自己的绝缘类型(多胶绝缘、少胶绝缘)、绝缘结构以及电机规格等情况制定出本厂定子线圈的匝间绝缘耐冲击电压试验规范。表 1.5-24 列出国内某厂交流电机圈式定子线圈匝间绝缘耐冲击电压试验中关于试验电压值的规定。

表 1.5-24 定子线圈匝间绝缘耐冲击电压试验值举例

试验阶段	导线成型后，对地绝缘前	线圈绝缘后，下线前	线圈下线后，接线前
试验电压(kV)(峰值)	$0.65\times(4U_N+5)$	$0.65\times(4U_N+5)\times0.9$	$0.65\times(4U_N+5)\times0.75$

注 U_N为电机定子额定电压，kV。

关于交流电机定子线圈匝间绝缘试验问题，国内外曾有多种多样的试验方法及相应的试验设备。经常用的试验方法主要有漏磁场检测法，感应电压法、中频电压法、输入波形

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

法以及脉冲电压法等，其中脉冲电压法是目前国内外普遍采用的一种方法。这种方法是利用充电后的电容器通过放电开关与被试线圈形成有一定频率的阻尼高频振荡电路，从而在被试线圈上产生衰减振荡脉冲电压。通过选择电容器的容量可控制振荡频率在一定范围内变化。脉冲电压法相对于其他试验方法的显著优点是可以产生较高的匝间试验电压，从而有利于发现匝间绝缘故障。另外，脉冲电压法可直接对被试线圈施加脉冲电压，并通过观察线圈两端电压或流过线圈电流的波形变化来判断线圈匝间绝缘的好坏，应用起来比较方便。目前，国内外的所有高压电机定子线圈匝间绝缘试验标准都推荐使用脉冲电压法。脉冲电压法的基本原理图如图1.5-27所示。图中C_1为脉冲电容，S为放电开关，R_s为限流电阻，R_w和L分别为被试线圈的电阻和电感。直流高压电源接通后，电容C_1开始充电。当充电电压达到一定值后，放电开关S（通常为球隙）放电，于是电容C_1与被试线圈的电感L形成阻尼振荡电路，在被试线圈上产生衰减振荡脉冲电压。脉冲电压的振荡频率约为$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}}$。按脉冲电压法原理制造的匝间绝缘试验设备有许多种，最高输出电压（峰值）有3kV、10kV、30kV、45kV等。主要型号有GZN-30型、GZN-45型、ZJ-45型、RZJ-30A型、RZJ-30型等。

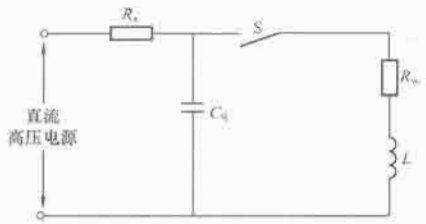


图1.5-27 脉冲电压法基本原理图

6.3 磁极线圈和磁极绕组匝间绝缘试验

测试凸极磁极线圈匝间有无短路的方法有多种。磁极线圈热压后套极前，可用1000～2500Hz10倍额定励磁电压（每极）的中频电压施加在磁极线圈的两端引出线上，然后根据流过线圈的电流大小（电流值的偏差应不大于2%）及有无局部发热情况来判断磁极线圈匝间有无短路。也可将磁极线圈的一个边套入开口变压器的铁心框中。然后把开口变压器的开口封闭，并对绕在变压器中的一次侧线匝上通上400～500Hz的中频电压（电压值按每匝20V计），观察电流变化来判断有无匝间短路。为了易于发现匝间绝缘缺陷，在进行匝间短路试验时，有时要在磁极线圈上施加相当于超速试验时离心力值的压力。

磁极线圈套入磁极铁心后，可用冲击电压来检查匝间有无短路。试验用的冲击电压也是由电容器放电产生的，直接施加在磁极线圈的引出线间。大型电机磁极线圈试验匝间短路所施加的冲击电压峰值可取每极1500V。

直流电机的磁场绕组匝间短路检查试验一般用中频电压感应法或中频电压比较法，对非直绕式磁场绕组，采用感应电压法来检查匝间有无短路。施加中频电压时，其有效值不超过$\sqrt{2}(2U_N+1)/\sqrt{3}$kV。

其他试验方法可参看JB/T 5810—1991《电机磁极线圈及磁场绕组匝间绝缘试验规范》。

6.4 定子线圈和绕组对地绝缘工频交流耐电压试验

交流耐电压试验是鉴定电机线圈和绕组绝缘强度的最有效和最直接的方法，它可以判断绝缘是否具有足够的介电强度水平，发现绝缘缺陷并把有缺陷的线圈淘汰出去。因为耐电压试验所用的电压值比运行电压值高得多，所以通过了耐电压试验的线圈和绕组，就可以避免在运行中发生绝缘事故。

对电机绕组对地绝缘耐电压试验的要求，在国家标准GB 755—2000《旋转电机定额和性能》中有规定。但GB 755中规定的试验电压是针对电机成品的绝缘绕组的，即针对电机出厂试验的。在此基础上，国家有关单位颁布了相应的一些行业标准，规范各种电机线圈和绕组的耐电压试验，其中国家机械行业标准JB/T 6204—2002《高压交流电机定子线圈及绕组绝缘耐电压试验规范》规定了2～24kV高压交流电机定子线圈及绕组对地绝缘制造时各个阶段耐电压试验的电压限值和试验方法。

在GB 755—2000和JB/T 6204—2002中，对工频交流耐电压试验的方法有如下规定：工频试验电压波形应为实际正弦波。试验时，施加的电压应从不超过试验电压全值的一半开始，然后均匀地或以不超过全值的5%分段地增加至全值，电压从半值增加至全值的时间不少于10s。在全值试验电压下的试验时间应维持1min。然后迅速将试验电压降到全值的50%以下，再断开电源。

线圈耐电压试验时，其槽部应包以锡箔或铝箔作为电极（或放入模拟铁心）。对于需防电晕处理的线圈，其耐电压试验应在防电晕处理后进行。试验时允许在低电阻层外缠绕柔软裸铜丝线作为电极，但裸铜丝线应尽可能绕紧且间距不大于10mm。电极的长度，对电机额定电压3kV及以下的线圈为铁心长加10mm，对3kV以上的线圈为铁心长加20mm。在定子线圈嵌入定子铁心后进行绕组对地绝缘耐电压试验时，试验电压应施加于绕组与机座之间。此时不参与试验的他相绕组、测温元件及铁心等均应与机座连接并接地。

根据JB/T 6204—2002《高压交流电机定子线圈及绕组绝缘耐电压试验规范》，下面将定子线圈及绕组在其对地绝缘固化成型后的工频交流耐电压试验的试验电压值（有效值）列于表1.5-25～表1.5-30中，供查阅。

1）圈式线圈及其组成的不分瓣定子，试验电压见表10.5-25。

2）圈式线圈及其组成的分瓣定子，试验电压见表10.5-26。

3）条式线圈及其组成的不分瓣定子，试验电压见表10.5-27。

4）条式线圈及其组成的分瓣定子，试验电压见表10.5-28。

5）整台圈式线圈在安装工地下线时，试验电压见表10.5-29。

6）整台条式线圈在安装工地下线时，试验电压见表10.5-30。

7）完全重绕的绕组，应与新电机一样用全值试验电压作试验。部分重绕的绕组，除成品线圈和线圈下线前阶段的试验电压按全值试验电压外，其他试验阶段的试验电压应为各相应阶段试验电压的75%。试验前应对未重绕的部分进行清洗和干燥。

8）同一台电机一般不应重复进行同一电压值的耐电压试验，但如用户对在制造厂已进行装配并试验的电机提出要求，允许再进行一次试验。其试验电压按GB 755—2000的规定应为电机装配后试验电压的80%。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

9）发电机的连接线和引出线固化后（包括电缆），在与线圈连接和焊接前，应进行 1min 耐电压试验，试验电压为 $2.0U_N+1.0$kV。

10）汽轮发电机定子绕组出线端绝缘子在电机制造厂应单独在空气中进行工频干法耐电压试验，试验电压不低于电机装配后试验电压的 1.5 倍，历时 1min。

11）对于额定电压 24kV 以上的电机，试验电压按专门协议。

表 1.5-25 圈式线圈及其组成的不分瓣定子的试验电压 单位：kV

序号	试验阶段	试验形式	试验电压		
			$S_N(P_N)<10$	$S_N(P_N)\geqslant10$	
			$U_N\geqslant2$	$2\leqslant U_N\leqslant6.3$	$6.3<U_N\leqslant24$
1	成品线圈	—	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+6.5$
2	下线打槽楔后	—	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+4.5$
3	并头、连接线绝缘后，定子完成	分相	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+4.0$
4	对浸漆固化后的定子	分相	$2.0U_N+2.0$	$2.5U_N+0.5$	$2.0U_N+4.0$
5	电机装配后	分相	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$

注 1. 非整体浸渍的绕组不执行序号 4。
2. 整体浸渍的绕组从序号 4 开始执行。
3. 对三个出线端绕组中性点不易分开的电机，允许不分相试验。
4. 表中 S_N（P_N）为电机额定容量（功率单位：发电机，MVA；电动机，MW；调相机，Mvar）。下同。
5. 表中 U_N 为电机定子绕组的额定电压，kV。下同。

表 1.5-26 圈式线圈及其组成的分瓣定子的试验电压

单位：kV

地点	序号	试验阶段	试验形式	试验电压		
				$S_N(P_N)<10$	$S_N(P_N)\geqslant10$	
				$U_N\geqslant2$	$2\leqslant U_N\leqslant6.3$	$6.3<U_N\leqslant24$
制造厂	1	成品线圈	—	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+6.5$
	2	下线打槽楔后	—	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+4.5$
	3	并头、连接线绝缘后	分相	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+4.0$
	4	对浸漆固化后的定子	分相	$2.0U_N+2.0$	$2.5U_N+0.5$	$2.0U_N+4.0$
安装工地	5	合缝线圈下线前	—	$2.75U_N+1.0$	$2.75U_N+1.0$	$2.75U_N+2.5$
	6	合缝线圈下线打槽楔后	—	$2.5U_N$	$2.5U_N+0.5$	$2.5U_N+2.5$
	7	连接合缝线圈，并关绝缘后，定子完成	分相	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$
	8	电机装备后	分相	$0.80\times(2.0U_N+1.0)$	$0.80\times(2.0U_N+1.0)$	$0.80\times(2.0U_N+1.0)$

注 1. 非整体浸渍的绕组不执行序号 4。
2. 整体浸渍的绕组从序号 4 开始执行。
3. 分瓣定子在制造厂进行装配并试验者，耐电压试验仍按表 1.5-25 进行。

表 1.5-27 条式线圈及其组成的不分瓣定子的试验电压

单位：kV

序号	试验阶段	试验形式	试验电压		
			$S_N(P_N)<10$	$S_N(P_N)\geqslant10$	
			$U_N\geqslant2$	$2\leqslant U_N\leqslant6.3$	$6.3<U_N\leqslant24$
1	成品线圈	—	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+6.5$
2	下层线圈下线后	—	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+4.5$
3	上层线圈下线后打完槽楔与下层线圈同试	—	$2.5U_N+2.0$	$2.5U_N+2.0$	$2.5U_N+4.0$
4	焊好并头，装好连线，引线包好绝缘，定子完成	分相	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+4.0$
5	对浸漆固化后的定子	分相	$2.0U_N+2.0$	$2.5U_N+0.5$	$2.0U_N+4.0$
6	电机装配后	分相	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$

注 1. 非整体浸渍的绕组不执行序号 5。
2. 整体浸渍的绕组从序号 5 开始执行。

表 1.5-28 条式线圈及其组成的分瓣定子的试验电压

单位：kV

地点	序号	试验阶段	试验形式	试验电压	
				$S_N(P_N)\geqslant10$	
				$2\leqslant U_N\leqslant6.3$	$6.3<U_N\leqslant24$
制造厂	1	成品线圈	—	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+6.5$
	2	下层线圈下线后	—	$2.5U_N+2.5$	$2.5U_N+4.5$
	3	上层线圈下线后打完槽楔与下层线圈同试	—	$2.5U_N+2.0$	$2.5U_N+4.0$
	4	焊好并头，装好连线、引线，包好绝缘	分相	$2.25U_N+2.0$	$2.25U_N+4.0$
安装工地	5	对浸漆固化后的定子	分相	$2.5U_N+0.5$	$2.0U_N+4.0$
	6	合缝线圈下线前	—	$2.75U_N+1.0$	$2.75U_N+2.5$
	7	合缝处下层线圈下线后	—	$2.5U_N+1.0$	$2.5U_N+2.0$
	8	合缝处上层线圈下线后打完槽楔与下层线圈同试	—	$2.5U_N+0.5$	$2.5U_N+1.0$
	9	焊好并头、装好连线、引线，包好绝缘，定子完成	分相	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$
	10	电机装配后	分相	$0.80\times(2.0U_N+1.0)$	$0.80\times(2.0U_N+1.0)$

注 1. 非整体浸渍的绕组不执行序号 5。
2. 整体浸渍的绕组从序号 5 开始执行。

表 1.5-29 整台圈式线圈在安装工地下线时的试验电压

单位：kV

地点	序号	试验阶段	试验形式	试验电压		
				$S_N(P_N)<10$	$S_N(P_N)\geqslant10$	
				$U_N\geqslant2$	$2\leqslant U_N\leqslant6.3$	$6.3<U_N\leqslant24$
制造厂	1	成品线圈	—	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+6.5$
安装工地	2	线圈下线前	—	$2.75U_N+1.0$	$2.75U_N+1.0$	$2.75U_N+2.5$
	3	下线打槽楔后	—	$2.5U_N$	$2.5U_N+0.5$	$2.5U_N+2.5$
	4	并头，连线绝缘后，定子完成	分相	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$
	5	电机装配后	分相	$0.80\times(2.0U_N+1.0)$	$0.80\times(2.0U_N+1.0)$	$0.80\times(2.0U_N+1.0)$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.5-30 整台条式线圈在安装工地下线时的试验电压

单位：kV

地点	序号	试验阶段	试验形式	试验电压		
				$S_N(P_N)<10$	$S_N(P_N)\geqslant10$	
				$U_N\geqslant2$	$2\leqslant U_N\leqslant6.3$	$6.3<U_N\leqslant24$
制造厂	1	成品线圈	—	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+4.5$	$2.75U_N+6.5$
安装工地	2	线圈下线前	—	$2.75U_N+1.0$	$2.75U_N+1.0$	$2.75U_N+2.5$
	3	下层线圈下线后	—	$2.5U_N+0.5$	$2.5U_N+1.0$	$2.5U_N+2.0$
	4	上层线圈下线后，打完楔与下层线圈同试	—	$2.5U_N$	$2.5U_N+0.5$	$2.5U_N+1.0$
	5	焊好并头，装好连线引线包好绝缘，定于完成	分相	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$	$2.0U_N+1.0$
	6	电机装配后	分相	$0.80\times(2.0U_N+1.0)$	$0.80\times(2.0U_N+1.0)$	$0.80\times(2.0U_N+1.0)$

6.5 定子绕组的直流耐电压试验及泄漏电流测量

泄漏电流是指在直流高压下通过绕组绝缘的电流。直流耐电压试验及测量泄漏电流在本质上与测量绝缘电阻是相同的，所不同的是施加于试样上的直流电压比测量绝缘电阻时更高。这样，一方面，因泄漏电流较大而不需要放大器就可以直接用微安表来测定，因此测量结果的重复性较好。另一方面，由于绝缘中存在的某些缺陷或弱点，只有在较高电场强度下才能暴露出来。因此，在较高的电压下，测出泄漏电流的变化规律，可以从中判断绝缘体内是否存在缺陷。

相对于交流耐电压试验，采用直流耐电压试验还有一些优点：直流耐电压试验时，因为不存在电容电流，故其绝缘表面也就没有显著电压降，因此不论离铁心多远，线圈导体与绝缘表面之间的电位差都是相当高的，这样就能使远离铁心的线圈端部的绝缘弱点也能击穿；直流耐电压试验时，因没有电容电流，所需试验设备的容量很小就足够；直流耐电压试验时，绝缘没有介质损耗，故绝缘不会发热而遭到损坏。

按 JB/T 6204—2002 的规定，只要求对额定功率为 10MW（或 MVA、Mvar）及以上且额定电压 6kV 级以上的汽轮发电机、水轮发电机及同步调相机，在制造厂内进行 $3.5U_N$、在安装工地进行 $3.0U_N$ 的 1min 直流耐电压试验。直流耐电压试验的电压按每级 $0.5U_N$ 分阶段升高，每一阶段电压维持 1min 以记录泄漏电流值及其变化。出现下列情况之一时，应尽可能找出原因，但不作不合格处理。

1）泄漏电流随时间异常增大。

2）在 $2.5U_N$ 的试验电压下，最大泄漏电流在 20μA 及以上，绕组相之间的泄漏电流差值大于较小一相泄漏电流的 50%。

6.6 同步电机磁场绕组对地绝缘耐电压试验

同步发电机、同步电动机和同步调相机的磁场绕组采用工频交流电压进行对地绝缘耐电压试验。试验方法同 6.4。根据 GB 755—2000 的规定，磁场绕组的出厂耐电压试验电压为 10 倍额定磁场电压，最低 1500V（额定磁场电压为 500V 及以下时）或 4000V 加 2 倍额定磁场电压（额定磁场电压为 500V 以上时）。电机厂根据国家标准的要求和不同产品的具体情况通常要制定出自己工厂的试验规范。表 1.5-31 和表 1.5-32 分别列出凸极磁极线圈和绕组对地绝缘耐电压试验的电压值和隐极转子线圈和绕组对地绝缘耐电压试验的电压值作为例子，供参考。

表 1.5-31 凸极磁极线圈和绕组对地绝缘耐电压试验电压值 单位：V

试验阶段	同步发电机		同步电动机	同步调相机
	$U_N\leqslant500$	$U_N>500$	起动时磁场绕组接电阻 $r\geqslant10r_1$（或开路）	起动时磁场绕组接电阻 $r<10r_1$（或短路）
线圈套入磁极铁心后，单个磁极完成	$10U_N+1500$ 最小 3000	$2U_N+5500$	$10U_N+1500$ 最小 3000	$10U_N+1000$ 最小 2500 最大 4500
磁极装入转子磁轭	$10U_N+1000$ 最小 2500	$2U_N+5000$	$10U_N+1000$ 最小 2500	$10U_N+750$ 最小 2250 最大 4250
极间连线并绝缘后	$10U_N+500$ 最小 2000	$2U_N+4500$	$10U_N+500$ 最小 2000	$10U_N+500$ 最小 2000 最大 4000
电机试验完成后装箱前	$10U_N$ 最小 1500	$2U_N+4000$	$10U_N$ 最小 1500	$10U_N$ 最小 1500 最大 3500

表 1.5-32 隐极转子线圈和绕组对地绝缘耐电压试验电压值

单位：V

试验阶段	试验电压
槽衬制造后	$10U_N+3500$
槽衬嵌入槽内后	$10U_N+2000$
单个线圈嵌入槽内后	$10U_N+1500$
打入永久槽楔后	$10U_N+1000$
套入护环之后	$10U_N+500$
其他试验完成后装箱前	$10U_N$

6.7 绝缘电阻及极化指数测量

电机绕组的绝缘电阻和极化指数是表示其绝缘状况的重要参数之一。在电机绕组进行耐电压试验前后及电机投运前常要测量绝缘电阻，并计算出极化指数，以判断绕组绝缘状况是否符合耐电压试验要求或运行要求。

测量电机绕组绝缘电阻通常采用绝缘电阻表。这是一种直接显示读数的兆欧表，并有带手摇式发电机的绝缘电阻表和带电动式发电机的绝缘电阻表等多种。手摇式绝缘电阻表因手摇速度不稳以及手摇时间长了容易疲劳，已逐渐被电动式绝缘电阻表所代替。测量电机绕组的绝缘电阻时，要选择合适的测量电压。如果使用过高的测量电压，则可能使绕组绝缘受到损伤。推荐的测量电压见表 1.5-33。

表 1.5-33 推荐的测量绕组绝缘电阻的电压值

绕组额定电压（V）	测量绝缘电阻的直流电压（V）
<1000	500
1000～2500	500～1000
2501～5000	1000～2500
5001～12000	2500～5000
>12000	5000～10000

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

绝缘中存在剩余电荷会引起绝缘电阻测量误差，因此在测量绝缘电阻之前，绕组必须彻底放电。每次在对绕组进行直流高压试验后，都必须充分放电，绕组接地时间至少应为充电时间的4倍。温度对绕组绝缘电阻的影响是非常显著的，当需要测量极化指数时，应在同一次测量不同时间的绝缘电阻值，并应使其间的温度变化最小。如果由于电机的质量较小，在测量绝缘电阻的10min内温度变化较大，则建议将不同时间不同温度下测得的绝缘电阻值都换算成同一温度下，然后再计算极化指数。测量电机绕组的绝缘电阻，最好每相单独试验，这样可以进行相间绝缘电阻比较，当一相绕组进行试验时，其他两相应与同一接地点接地，如定子铁心或转子本体。当测量绕组绝缘电阻的电压高于5000V时，从电压源到绕组的引线必须绝缘屏蔽，引线线径要大，离地要有足够距离，以减少由泄漏电流等引起的误差。

用极化指数P.I值与绝缘电阻一起常可判断绕组绝缘是否受潮、受污染或绝缘开裂。干燥绝缘时，P.I值还可以显示干燥过程何时可以结束。但如果绝缘绕组在1min时测得的绝缘电阻值在5000MΩ以上，则所计算的P.I值就没有意义了。这种情况下，就不用P.I值来衡量绕组绝缘的状况了。

6.8 其他电机绕组绝缘性能试验

根据产品的不同要求，有时要对电机绕组绝缘进行其他一些电气性能试验，如定子线圈和绕组介质损耗因数试验、局部放电试验、线圈槽部表面电位测量、汽轮发电机定子绕组鼻部绝缘泄漏电流测量（或表面电位测量）、定子线圈主绝缘耐冲击电压试验等。

定子线圈的介质损耗因数测量对一些大型电机来说属于常规检查项目，如DS/ZJ 011—2002《大型水轮发电机产品质量分等》和CEEIA 158—2003《汽轮发电机产品质量分等》中规定，水轮发电机每台份抽全台线圈的3%的线圈、汽轮发电机每台份抽全台线圈10%的线圈进行常态下介质损耗因数检测。测试时电压从$0.2U_N$升至$1.2U_N$或$1.4U_N$，其间间隔$0.2U_N$，记录每一个测量电压下的$\tan\delta$值，并计算$(\tan\delta_{0.6U_N}-\tan\delta_{0.2U_N})/2$和各$0.2U_N$间隔的$\Delta\tan\delta$值。

定子绕组的介质损耗因数测量一般在电机定子绕组端部喷表面覆盖漆前进行。测试时一般是在绕组接高压，铁心和机座作测量极，这时整个铁心和机座与地之间用绝缘板隔离开。如果铁心和机座无法与地绝缘开，则施加电压的变压器高压绕组的接地线须与地隔离开。

局部放电试验可以在线圈上做，也可以在绕组上做。在电机定子绕组上进行局部放电试验时，将定子铁心、测温元件接地，在定子绕组上施加交流电压。一般要求测试在$U_N/\sqrt{3}$电压下的最大放电量Q_{max}，并测量放电量为1×10^3pC和1×10^4pC时的起始电压值。有时要求测最大放电量Q_{max}时，施加电压从1kV开始，每加1kV测一次，一直测到额定电压（线电压）为止。线圈槽部表面电位测量在线圈嵌入定子铁心槽中并固定后进行。测试时电机绕组加上$U_N/\sqrt{3}$交流电压，用连有电压表的金属触头（操作者通过绝缘棒控制）接触线圈表面，同时读取电压表上读数。要求槽电位不大于10V。

汽轮发电机定子绕组鼻部绝缘系定子线棒嵌入铁心槽中，并连接并头后手工包扎上去的，一般采用边包云母带边涂刷室温固化环氧胶或云母带上先涂环氧胶然后再包扎的绝缘工艺。由于此处手包绝缘与线棒模压绝缘搭接，水内冷定子此处还有水接头，因此绝缘难度较大，容易出现绝缘弱点。加上汽轮发电机定子绕组端部常受油、水污染，绝缘弱点就会引起鼻部绝缘处泄漏电流增大、爬电、相间放电、击穿。为了防止出现这种情况，杜绝鼻部绝缘出现弱点，国内于20世纪90年代起陆续开展了氢内冷汽轮发电机定子绕组鼻部绝缘泄漏电流测量或表面电位测量。其中泄漏电流测量的具体方法是：在已装配好的定子上将三相绕组引出线相连并接在一直流微安表的一个端子上，直流微安表的另一端子接地；将定子绕组的鼻部绝缘处包上一层铝箔作为电极；用一个绝缘杆将直流高压发生器产生的直流高压（直流高压值为电机额定电压值）通过高压导线引出，并使高压导线接触鼻部绝缘的铝箔。将直流高压施加到铝箔电极上，同时读取直流微安表上的电流值，此电流值即为泄漏电流值。鼻部绝缘泄漏电流标准例子见表1.5-34。

定子线圈主绝缘耐冲击电压试验一般属于随机抽样试验，其标准可参见国家机械行业标准JB/T 10098—2000《交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平》。主绝缘耐冲击电压试验可采用工频电压也可采用冲击电压。采用工频电压试验时，在线圈引出线端与地之间施以规定的$(2U_N+1kV)$的工频电压，维持1min，接着以1kV/s升高电压，使电压值达到$2(2U_N+1kV)$，然后立即以至少1kV/s的速度降低电压至零。过程中如不发生击穿，即认为主绝缘相应的耐冲击电压水平和端部防电晕已满足要求。

采用冲击电压试验时，以冲击电压发生器提供试验电压，其冲击电压的波前时间为1.2μs，半峰值时间为50μs。冲击电压的峰值为$U_P=4U_N+5kV$。冲击电压施加到线圈引出线端与地之间，冲击次数5次。

表1.5-34 200MW、300MW水氢氢汽轮发电机定子绕组鼻部绝缘泄漏电流限值

部　位	U_N=15.75kV	U_N=18kV	U_N=20kV
新电机手包绝缘引线接头及汽机侧隔相接头	8μA	9μA	10μA
新电机鼻部接头	12μA	14μA	16μA

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 6 章　电机的发热与冷却

1　概述

电机运行时将产生各种损耗。这些损耗转变成热量，使电机各部件发热，温度升高。电机中的某些部件，特别是电机的绝缘，只能在一定的温度限值内才能可靠工作。为维持电机的合理寿命，需要采取适当的措施，将电机中的热量散发出去，使其在允许的温度限值内运行。电机冷却的目的，就是根据不同类型的电机，选择一种合理的冷却方式，保证在额定运行状态下，电机各部分温度不超过国家标准允许的限值。

电机的冷却方式，主要是指对电机散热采用什么冷却介质和相应的流动途径。一种合理的冷却方式，应该是具有最适当的冷却介质流量和合理的流动途径，以最小的流量达到最有效的冷却，同时，耗用的功率小，结构简单，造价低，运行安全可靠。改进电机的冷却技术，对提高电机的利用系数和效率及增加可靠性和寿命，特别对提高大型电机的单机容量，都具有重要的意义。

2　电机的发热

研究电机的发热与冷却，首先应了解电机的热源（损耗）及其分布，以便采取相应措施把热量散出，达到有效地冷却电机各部件的目的。

2.1　电机损耗的分类

参见本篇第 2 章第 6 节。

2.2　电机中各种损耗的分布

为保证电机有效地冷却，需要按电机各部分损耗的多少和散热路径，按比例分配各部分的冷却介质，以避免局部过热。这对大型汽轮发电机和水轮发电机尤其重要。表 1.6-1～表 1.6-3 列出了不同冷却方式的汽轮发电机和水轮发电机的损耗分布。

表 1.6-1　空冷汽轮发电机的损耗分布

容量(MW)	12.5	30	50	60	135
通风损耗和风摩损耗(%)	32	24	42	29	36
定子铁损耗(%)	27	36	27	29	19
转子铜损耗(%)	15	21	10	20	24
定子铜损耗(%)	12	11	9	12	12
轴承损耗(%)	8	5	9	7	7
转子铁损耗(%)	6	3	3	3	2

表 1.6-2　氢冷和氢-水冷汽轮发电机的损耗分布

容量(MW)	100	150	200	300	500	600
空载损耗(%)	51	42	36	31	28	31
其中机械损耗(%)	25	20	19	17	—	22
短路损耗(%)	28	33	41	41	46	41
励磁损耗(%)	21	25	23	28	26	28

注　100MW 为全氢冷，150～500MW 为定子绕组水冷、转子氢内冷。括号内数字包括通风损耗和轴承损耗。

表 1.6-3　水轮发电机的损耗分布

损耗种类	空气冷却		定子水冷	
	低速电机	高速电机	常规性	贯流型
空载损耗(%)	54	69	34	13
其中机械损耗(%)	30	48	21	4
短路损耗(%)	24	19	45	60
励磁损耗(%)	22	12	21	27

3　电机发热的影响

3.1　电机发热对绝缘寿命的影响

绝缘在额定温度 t_N 下持续运行的合理寿命为 6～8 年（平均为 7 年），因此，不同工作温度下绝缘寿命为

$$L_t = 7 \times 2^{\frac{t_N - t}{m}} \qquad (1.6\text{-}1)$$

式中，t_N 为绝缘的额定温度，℃；t 为绝缘实际使用的持续温度，℃；m 为常数，对于 B 级绝缘，$m \approx 10$；对于 F、H 级绝缘，m 分别取 12 和 14。

由式（1.6-1）可见，对于 B、F、H 级绝缘，温度 t 分别每上升 10℃、12℃、14℃，寿命将缩短一半。

3.2　电机发热对某些金属材料性能的影响

金属材料的强度和硬度随温度升高而下降。电机中常用的铜、铝、铝合金、银铜和钎焊材料的抗拉强度、硬度与温度的关系如图 1.6-1～图 1.6-4 所示。

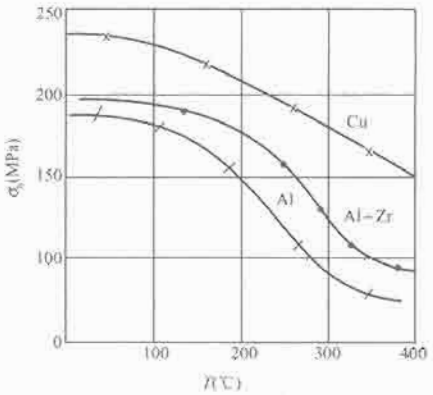


图 1.6-1　铜和铝的抗拉强度与温度的关系

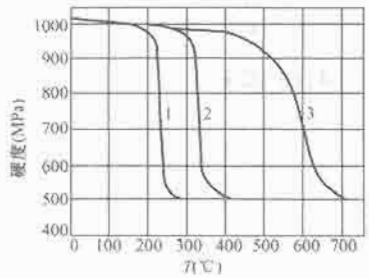


图 1.6-2　铜的硬度与温度的关系
1—电解铜；2—银铜；3—锆铜

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

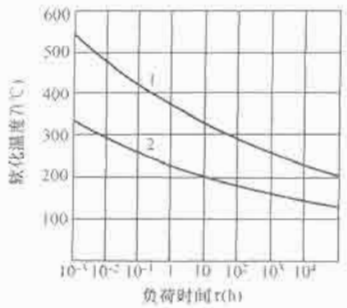


图 1.6-3 铜的软化温度与加温时间的关系
1—银铜；2—电解铜

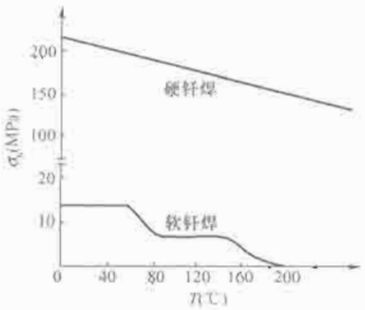


图 1.6-4 钎焊材料的抗拉强度与温度的关系

大型电机某些部件或其局部的温度可能很高，如由定子负序磁场感生的双频电流可在汽轮发电机转子槽楔以及转子大齿（极身）横向槽两端导致 300～400 ℃的高温。同步电机实心磁极和阻尼绕组在不平衡负荷或起动过程中的温度，也可能超过 250～300℃。高电负荷电机的定子压圈内侧、压指或端罩、在某些运行状态下也可能出现高温区域。这些除将对线圈绝缘直接或间接造成一些危害外，对邻近金属材料的机械强度产生的影响也不可忽视。

常用的电解铜，当其温度超过 220 ℃时，硬度迅速下降，到 280 ℃时，几乎只有原来的一半。含银铜线较好，但也不能超过 300 ℃。

即使温度不太高，但持续时间长也能造成金属软化。大电机中局部温度超过 160～170℃是可能的，这就要有预见地考虑到热变形和热应力的影响。

4 电机的温升

4.1 温升

电机运行中测得的各部分的温度与冷却介质入口温度之差，称为电机相应部分的温升。

4.2 我国电机温升限值标准

我国电机温升限值标准（GB 755《旋转电机 定额和性能》），与 IEC 60034-1 标准一致。

4.3 影响电机温升的因素

4.3.1 环境温度对电机温升的影响

按照 GB 755 的规定，电机运行地点的环境空气温度，不超过 40℃。实际上，未必正好是 40℃。环境温度的变化对电机温升的影响表现在以下几方面：

1）铜的电阻率随温度变化而变化，这将引起铜损耗变化。

2）温度变化使流体介质的物理参数，如运动粘度、热导率、表面传热系数等也发生变化。不同空气温度时的传热系数 α_{t_a} 与 0℃时传热系数 α_0 之比，见表 1.6-4。

表 1.6-4 空气在不同温度时的传热系数与在 0℃时传热系数之比

t_a(℃)	0	10	15	20	25	30	35
α_{t_a}/α_0	1	0.989	0.984	0.979	0.975	0.971	0.968
t_a(℃)	40	45	50	55	60	65	
α_{t_a}/α_0	0.964	0.962	0.959	0.957	0.954	0.952	

3）流体的比定压热容 c_p 随温度升高而减少，使单位体积流量的热负荷能力降低。

4）绝缘材料的热导率也随温度的变化而变化。

因此，环境温度变化使电机中的热源（损耗）和散热条件发生双重变化，电机温升也随之变化。GB 755 和 IEC 标准中都规定了具体修正办法。

4.3.2 海拔对电机温升的影响

海拔对温升的影响表现在三个方面：

1）空气压力变化导致空气密度变化，使表面传热系数变化。

2）海拔变化引起空气密度及通风损耗变化。

3）海拔变化引起空气比定容热容变化。

通常，对在高海拔处运行的电机采用如下方法进行补偿：

1）增大冷却介质流量，如图 1.6-5 所示。

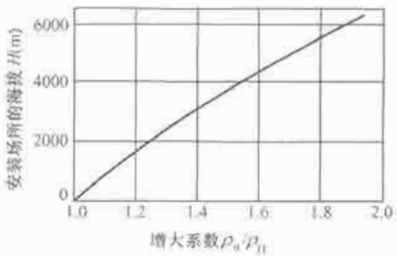


图 1.6-5 进风温度 40℃时，在高度为 H 处安装的电机，在计算冷却空气流量时的增大系数 ρ_0/ρ_H（ρ 为气体密度）

2）降低电机功率。实际由于海拔增高，环境温度随之降低，使电机温升得到补偿。从两者综合考虑，海拔对电机温升的影响不显著。

4.3.3 电机结构、工艺对温升的影响

电机绝缘温降和铁心温降，通常占电机温升的 40%～60%，而这两项均与电机的结构、材料和加工工艺有关。因此，选用热导率高的材料，提高结构的合理性，提供工艺质量，对改善电机的冷却很重要。

5 电机的散热与冷却

5.1 电机的散热

电机内由损耗产生的热量，首先借传导作用传递到与冷却介质相接触的表面，然后再通过对流和辐射作用散发到周围介质。

5.1.1 热传导

热流量 Φ_t 穿过厚度为 d、过流面积为 A_t、热导率为 λ 的物体时，产生的温差为

$$\left.\begin{aligned}\theta_t &= R_t\Phi_t \quad (\mathrm{K})\\ R_t &= \frac{d}{\lambda A_t} \quad (\mathrm{K/W})\end{aligned}\right\} \tag{1.6-2}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

热流通过 n 层厚度 d_n 不同和热导率 λ_n 不同的层叠材料（n 层材料热阻串联）时，合成热导率 $\lambda=\Sigma d_n/\Sigma(d_n/\lambda_n)$；热流通过 n 层并列的材料时，$\lambda=\Sigma(d_n\lambda_n)/\Sigma d_n$。空气的 λ 值很小，所以在传热路径上（如电机绕组绝缘层、线圈与槽壁之间）都应采取措施避免或尽量减小空气间隙，以加强传热效果。不同物质的热导率见表 1.6-5～表 1.6-8 和表 1.6-10。

表 1.6-5　几种金属在不同温度时的热导率

单位：W/(m·K)

材料	成分①	0℃	100℃	200℃	300℃	400℃
铜	99.9%	386	379	373	369	364
黄铜	Cu70% Zn30%	115	129	143	147	148
银	99.9%	411	415	412	373	361
铝	99.2%	221		205		
杜拉铝	Al96%	159	182	194	202	
铁、优质碳素结构钢	C≤0.5%	59	57	52	48.4	44.8
结构钢	C≈0.5%	55	52	48.4	44.8	42
不锈钢	18Cr8NiV2A	163	17.3	17.4	19	19
转子锻钢	0×H1M 34CrM01A	44.2				
转子锻钢	0×H3M 35CrNi3M0A	39.5				

① 百分数皆为成分的质量分数。

表 1.6-6　常用金属在 50℃ 时的热导率　单位：W/(m·K)

名　称	热导率 λ
铸铁	30～46
铸钢	约 52
合金铸钢	27～37
钢	40～46
耐热钢	16
不锈钢	25～30
合金钢	33～40
非磁性钢	14～16
电解铜	约 390
易切削铜	380
黄铜	110
青铜	100
锌	110
铅	35
纯铝	220
铝锰合金	190
铝镁合金	130
铝铁合金	95～140

表 1.6-7　120℃ 时硅钢片及其叠片铁心的热导率

硅钢片①		0.5mm 硅钢片叠压的铁心②	
含硅量(%)	热导率 λ [W/(m·K)]	压紧力 (MPa)	热导率 λ [W/(m·K)]
1	38	0.5	0.6
2	29	1	0.8
3	23	2	0.95
4	20		

① 沿硅钢片（横向）。

② 垂直于两面涂漆的硅钢片平面（纵向）。

表 1.6-8　几种绝缘材料和非金属材料的热导率

单位：W/(m·K)

名　称	热导率 λ
瓷	1.1～1.6
石棉	0.2
云母	0.4～0.6
棉布、云母带、亚麻布	0.04～0.07
漆布	0.15～0.3
纸	0.05～0.15
聚酰胺纸	0.13
硬纸板	0.2～0.3
浸渍纸	0.15～0.2
木材	0.14～0.3
胶质板	0.23～0.28
玻璃布板	0.25～0.4
亚麻布底云母纸	0.08～0.2
云母浸渍布	0.15～0.2
褐云母（25%黏合剂）	0.25～0.3
云母浸渍布	0.3～0.4
压制云母箔	0.2～0.3
褐云母	0.23
集电环云母箔	0.17～0.23
云母－人造树脂绝缘	0.29～0.33
电木	0.15～0.20
环氧树脂	0.2～0.5
具有石英粉的环氧树脂	0.1～0.35
不饱和聚酯树脂	0.2～0.24
热塑性塑料	0.17～0.27
聚四氟氯乙烯	0.2～0.35
天然橡胶	0.9～1
烘干的浸渍漆	0.14～0.16
沥青化合物	0.10
石油	0.15

注　绝缘的热导率与温度有关，表中数值以 50℃ 为基准。

5.1.2　对流传热

通过运动的气体或液体冷却介质流过固体表面而进行热量传递，称为热对流。对流传热主要是在电机的定子铁心气隙、轭部背部表面、定子通风沟表面、绕组端部表面、磁极绕组表面、内冷线圈内表面、换向器表面以及机座和端盖的外表面等处。根据牛顿定律，通过对流传热作用从物体表面传递到周围运动的冷却介质的热流量为

$$\left.\begin{aligned}\Phi_c&=\frac{\theta_c}{R_c}\quad(\mathrm{W})\\ R_c&=\frac{1}{\alpha A_c}\quad(\mathrm{K/W})\end{aligned}\right\}\tag{1.6-3}$$

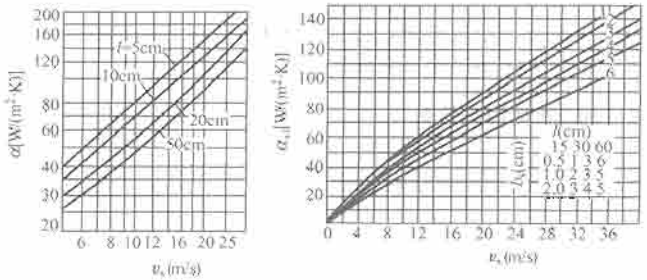
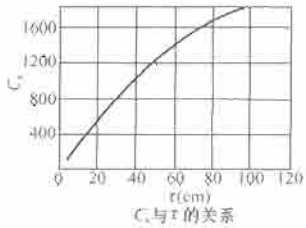
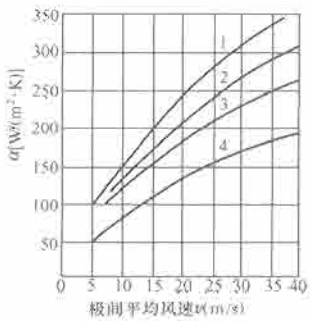
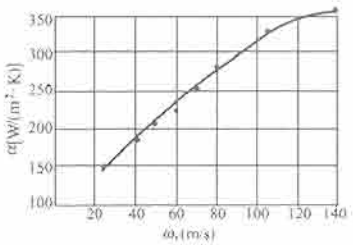
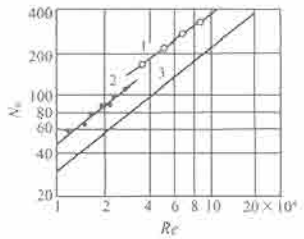
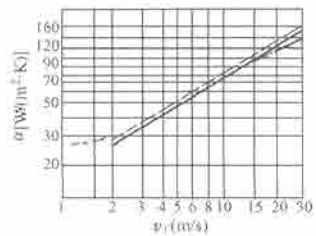
式中，θ_c 为发热体表面与介质的温差，K；R_c 为对流热阻；A_c 为散热表面积，m^2；α 为对流传热系数，见表 1.6-9。

α 与介质沿发热体表面的流速梯度，介质的热导率、密度、动力粘度和热容等有关。提高冷却介质的流速可以提高对流传热的效果。

对流传热又分为自然对流和强迫对流。散热表面的流体由于吸收了热量，密度减小产生浮力引起的流动，为自然对流。如果散热表面的冷却介质是借外力强迫流动而传热的，为强迫对流。前者散热能力较低，通常只存在于没有用任何通风元件扇风的小型电机中，特别是在某些特殊用途电机中。后者则普遍用于各种类型的电机。

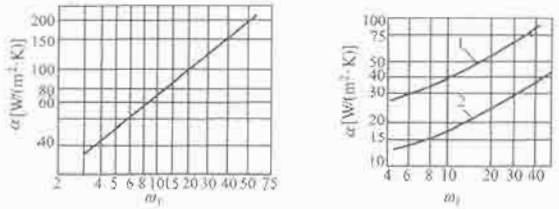
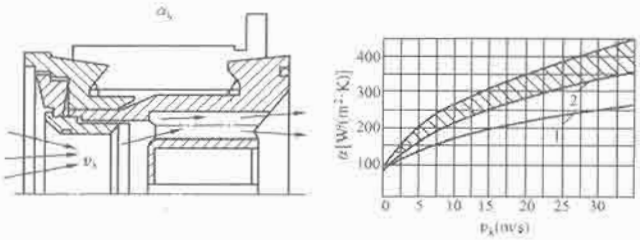
标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 I.6-9 电机典型表面的传热系数

典型表面	传 热 系 数
定子径向通风沟、轴向通风道	 l—风沟长；b_s—风沟宽；v_s—平均风速
水轮发电机线圈端部	 C_τ与τ的关系 $\alpha=\frac{(1+0.07v_\tau)\times10^3}{v_s}$ [W/(m²·K)] 式中，v_τ为转子圆周速度，m/s；τ为极距，cm
凸极同步机磁极线圈（由不同翅高的七边形铜线制成）	 1—翅高=10mm 2—翅高=7mm 3—翅高=4mm 4—翅高=0
定、转子表面（气隙中）	 $\omega_\tau=\sqrt{(0.5v_\tau)^2+c^2}$ (m/s) 式中，v_τ为转子圆周速度，m/s；c为轴向风速，m/s
定子轭背与机座间环状间隙（气流轴向流过）	 $\alpha=\frac{Nu\lambda}{d}$ 注：图中 1、2、3 为三位学者得出的三种结果，应用时，可取其平均值 Re—雷诺数 Nu—努塞尔数
绕线转子异步电机转子绕组端部	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

典型表面	传　热　系　数
主极和换向极线圈表面	 1—同步电机磁极线圈；2—直流电机磁极线圈；对径向通风系统，$\omega_l \approx (0.25\sim0.45)\ v_r$；对轴向通风系统，$\omega_l \approx 0.5 v_r$
直流电机换向器表面	 v_k—平均风速；1—无轴向通风；2—有轴向通风（画阴影线区）

5.1.3　辐射换热

根据斯忒藩-玻耳兹曼定律，一个物体每平方米表面辐射出的热量为

$$Q'_R = C_R\left[\left(\frac{T_R}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4\right] \quad (\mathrm{W/m^2}) \quad (1.6\text{-}4)$$

式中，T_0 为周围介质温度，K；T_R 为物体表面温度，K；C_R 为热辐射系数，$\mathrm{W/(m^2 \cdot K^4)}$，绝对黑体 $C_R=5.8$，电机中的标准热辐射表面 $C_R=5$。

实际上，在电机的温度范围内，可用下列近似公式

$$Q_R = Q'_R A_R \approx \alpha_R A_R \theta_R \quad (\mathrm{W}) \qquad (1.6\text{-}5)$$

式中，θ_R 为发热体表面与周围介质的温差，K；A_R 为发热体的表面积，$\mathrm{m^2}$；α_R 为辐射换热系数，电机可近似取 $\alpha_R=(5\sim7)\times10^{-4}\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$。

当采用强迫对流冷却电机时，辐射换热作用常可略去；而采用自然对流时，则应考虑辐射换热的作用。按 IEC 有关标准规定，实测大型电机的效率时，尽可能采用量热法，这时就必须较精确地计入由辐射散出的热量。

实际上，一台电机的散热是各种散热方式综合作用的结果。通常，在上述三种散热方式中，热传导和对流传热是最主要的。

5.2　电机的冷却介质

5.2.1　对冷却介质的要求

对电机冷却介质的基本要求是：

1）比热容（或汽化热）大。比热容大，则单位体积介质在同一温升下带出的热量就多。

2）黏度小。当速度不变时，黏度小则放热能力大，流动摩擦阻力小。

3）热导率高。当热流强度相同时，热导率越高，热交换能力越强，内部温降越低。

4）密度低。对气体介质，密度低，则通风损耗较小；对液体介质来说，消耗在泵上的功率很小，但考虑传热能力，不一定要求密度低。

5）介电强度高，以减少产生电晕的可能性，有利于安全。

6）无毒、无腐蚀作用，化学性能稳定。

7）价廉易得。

5.2.2　冷却介质特性

电机常用冷却介质的特性，见表 1.6-10～表 1.6-12。

表 1.6-10　常用冷却介质在标准压力下的特性

冷却介质	温度 θ (℃)	密度 ρ ($\mathrm{kg/m^3}$)	比定压热容 c_p [J/(kg·K)]	比定容热容 c_V [J/(m³·K)]	热导率 λ [W/(m·K)]
氢气 (H_2)	20	0.084	14310	1200	0.179
	40	0.078	14370	1130	0.187
	60	0.074	14410	1060	0.195
氦气 (He)	20	0.166	5200	860	0.148
	40	0.156		810	0.155
	60	0.146		760	0.161
氮气 (N_2)	20	1.165	1040	1210	0.0255
	40	1.091		1140	0.0270
	60	1.025		1070	0.0284
空气 (干燥)	20	1.205	1010	1210	0.0257
	40	1.128		1140	0.0271
	60	1.060		1070	0.0285
油 (轻矿物油)	20	878	1900	1670×10^3	0.12
	40	865		1640×10^3	
	60	853		1620×10^3	
水 (H_2O)	20	998	4180	4170×10^3	0.595
	40	992		4140×10^3	0.625
	60	983		4110×10^3	0.645

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.6-11 常用冷却介质的传热系数

冷却介质及状态	α[W/(m²·K)]
空气自然传热	<10
空气强迫对流传热	15～290
过热蒸汽	60～180
变压器油	60～1750
氢	115～520
氢(0.1～0.4MPa)	250～2090
水	300～17500

表 1.6-12 常用冷却介质热性能参数对比

	空气①	氦	氢	氦②	油	水
运动粘度	1	6.6	7.3	3.6	2.2	1/16
同一流速下传热系数	1	1.34	1.7	27.5	22.2	570
同一流量下传热系数	1	5.5	11.8	11.8	1/32	2.35
同一放热系数下流速	1	0.72	0.5	0.25	1/60	1/3100
同一放热系数下流阻	1	0.91	0.5	0.125	1/520	1/6200

① p=0.1MPa。

② p=0.2MPa。

5.2.3 冷却介质的流量及压力

冷却介质流量 q 的大小，按需要携带的损耗 P 和冷却介质温升 θ 确定。冷却介质的比定容热容 c_V 起着重要作用，所携带的损耗与冷却介质流量的关系为

$$P = c_V q\theta \quad (\mathrm{W}) \tag{1.6-6}$$

例如，当一台电机的损耗为 100kW，冷却空气的温升 θ=22K，空气在 40℃ 标准压力下的比定容热容 c_V=1140 J/(m³·K)，则所需冷却介质的流量 $q\approx 4\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$。

按照流体力学原理，当冷却介质通过电机时，由于流体存在黏性，在整个流动过程中将产生摩擦损失（沿程阻力损失）；由于流道形状、尺寸变化或发生某些障碍时，流体质点之间的相对速度、方向将发生变化，质点之间互相混杂，撞击加剧，在这些部位消耗一部分能量，即局部损失。它们以压力降的形式表示为

$$\text{摩擦损失} h_V = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \frac{l_i}{d_h} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (\mathrm{N/m^2}) \tag{1.6-7}$$

$$\text{局部损耗} \quad h_j = \xi \frac{\rho}{2} v^2 \quad (\mathrm{N/m^2}) \tag{1.6-8}$$

式中，ξ 为局部阻力系数；λ_i 为沿程（摩擦）阻力系数；l_i 为流道长度，m；d_h 为水利直径，m；v 为流体流速，m/s。

λ_i 与流体的流动状态（或雷诺数 Re 值）及流道表面粗糙度有关。当 Re<2300 时为层流，$\lambda_i = 64/Re$；当 Re>2300 时为湍流，λ_i 与 Re 的关系，如图 1.6-6 所示。有关电机设计中常用的局部阻力系数，可查阅有关文献。

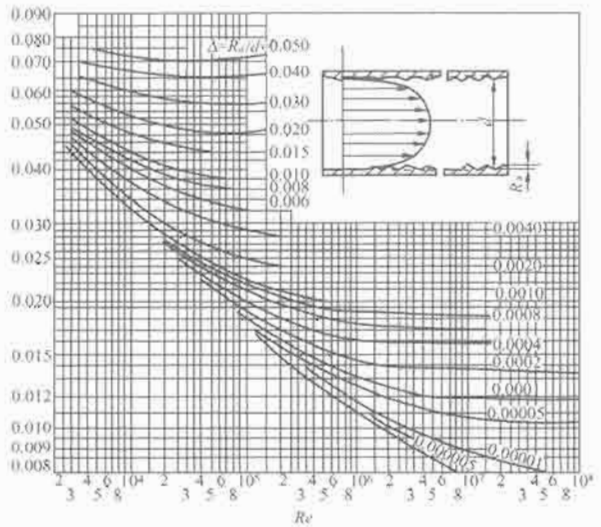


图 1.6-6 湍流适用沿程阻力系数

电机冷却流道一般比较复杂，应分段计算各段的压力降落，然后叠加；或者计算各段的流阻后再计算总的流阻，参见本章第 5.4.3 节。

5.2.4 蒸发冷却用介质

蒸发冷却利用液体汽化潜热带走热量，与常规的对流放热截然不同。由于汽化热数值较大，需要冷却介质量很少，功率消耗也就很少。氟利昂 F113 是前期研制及电站运行中常采用的冷却介质。它具有介电强度高、汽化点适宜、化学稳定、不助燃、无爆炸性危险、无毒、无腐蚀等优点，但氟利昂存在着对大气臭氧层的破坏作用。目前已经开始使用替代冷却介质 HFC-4310，它具有 F113 的一切优点，但对大气臭氧层无破坏作用。

5.3 电机的冷却方式及其选用

电机的冷却方式主要按冷却介质的种类、冷却回路的布置型式及冷却介质的驱动方式等进行分类。电机常用的冷却方式及其适用范围见表 1.6-13。

表 1.6-13 电机常用的冷却方式及其适用范围

冷却方式	特 点	使用范围
表面冷却	一次冷却介质在电机内部循环，该介质吸收的热量通过封闭的机壳表面传递给周围介质。其散热面积为机壳的表面，为增加散热面积，机壳表面常加冷却筋。该方式结构简单	常用于封闭式的小型电机
开启通风冷却	一次冷却介质为电机周围的空气，直接送入电机内，吸收热量后向周围环境排出。该方式结构简单，冷却效果好	常用于一般清洁、无腐蚀、无爆炸环境下的开启式和防滴式电机
密闭通风循环冷却	一次冷却介质与周围环境隔离自成闭合循环回路。一次冷却介质吸热后通过回路中的冷却器将热量传递给二次冷却介质带出机外。二次冷却介质通常是空气或水。冷却效果很好	用于大中型交流电机、汽轮发电机和水轮发电机
直接水冷	用水作一次冷却介质直接引入定子或转子空心导体内部，能显著提高冷却效果。结构复杂，水要经过处理，水的电导率应低于 2～5 μS/cm，硬度小于 5μmol/L，pH=6～9	用于大型汽轮发电机和水轮发电机

5.4 电机的通风系统

5.4.1 分类

根据电机内部一次冷却介质的流动方向，可分为径向、轴向和径向-轴向混合通风系统，如图 1.6-7 所示。采用径向通风系统时，沿电机轴向的温度均匀，但一般均需把铁心沿轴向分段并设置径向通风沟而使电机长度略有增长；采用轴向通风系统时，铁心结构较紧凑，但沿轴向上温度差较大；径向-轴向混合通风系统对应一定结构可获得较好的通风效果。选用电机通风系统时应视电机容量、转速、铁心长度、结构以及已有经验等而定。

5.4.2 电机通风系统的结构

表 1.6-14 中列出了不同类型电机典型的通风系统结构及其等效风路图。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

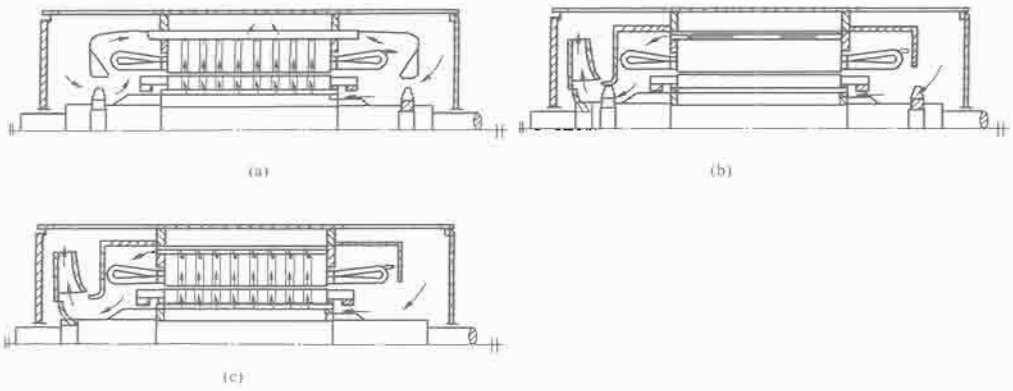
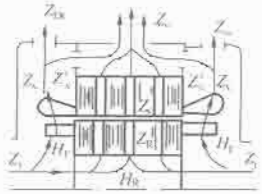
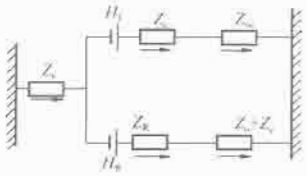
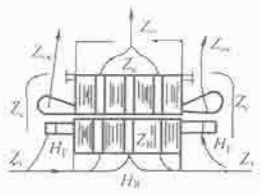
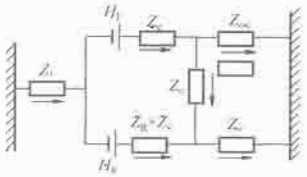
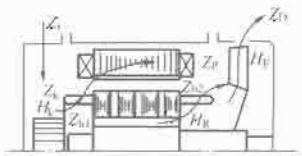
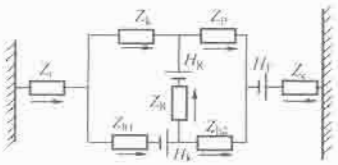
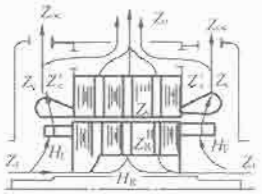
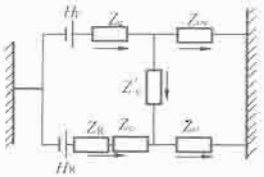
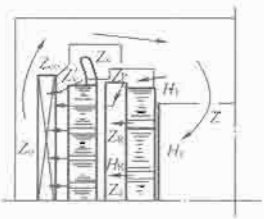
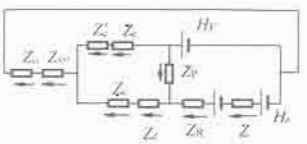
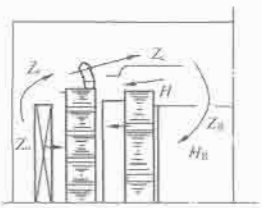
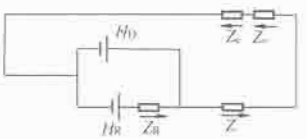


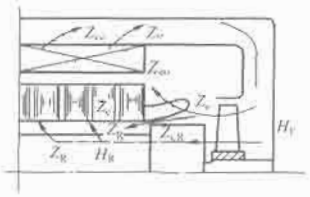
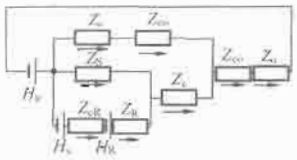
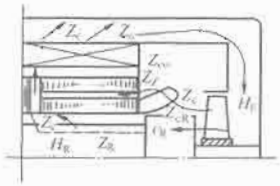
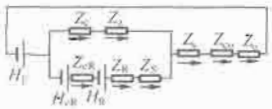
图 1.6-7　电机的通风系统
(a) 径向；(b) 轴向；(c) 径-轴向

表 1.6-14　不同类型电机典型的通风系统结构及等效风路图

电机类型	通风系统结构	等效风路	备　注
大型异步电机			端部与有效段联通
大型异步电机			端部与有效段隔开
大型直流电机			出风侧有离心风扇
低速大型同步电动机			—
立式水轮发电机			有风扇，径轴向通风
			无风扇，端部回风，径向通风

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

电机类型	通风系统结构	等效风路	备 注
空冷或氢冷汽轮发电机			径向通风
			径向-轴向通风

5.4.3 通风系统计算要点

电机通风系统计算的目的在于确保系统中必需的流量，或是在已知的阻力系统下选择一个或几个合适的压头元件。和电路相类似，风路计算中有三个基本参数，即风压、风阻和流量，与电路中的电压、电阻和电流分别对应。不同的是风路中的压差与流量的二次方成正比，而电路中则是线性关系。两者的对比见表 1.6-15。

表 1.6-15 风路与电路的特征对比

风 路	电 路
流量 Q（m^3/s）	电流 I（A）
风压 H（N/m^2）	电压 U（V）
风阻 Z_v（$N\cdot s^2/m^8$）	电阻 R（Ω）
$Z_v=\frac{\xi'}{A^2}$ 或 $Z_v=\lambda'\frac{l_i}{d_{sh}}\frac{1}{A_i^2}$	$R=\rho\frac{l}{A}$
式中，ξ'为局部风阻系数，$N\cdot s^2/m^4$；λ'为沿程风阻系数，$N\cdot s^2/m^4$；A、A_i为截面积，m^2；l_i为长度，m；d_{sh}为水利直径，m	式中，ρ为电阻系数，$\Omega\cdot m$；l为长度，m；A为面积，m^2；
$H=Z_vQ^2$	$U=IR$
风阻串联 $Z_v=Z_{v1}+Z_{v2}+\cdots+Z_{vi}$	电阻串联 $R=R_1+R_2+\cdots+R_i$
风阻并联 $\frac{1}{\sqrt{Z_v}}=\frac{1}{\sqrt{Z_{v1}}}+\frac{1}{\sqrt{Z_{v2}}}+\cdots+\frac{1}{\sqrt{Z_{vi}}}$	电阻并联 $\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_i}$
$Z_v=\frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{Z_{v1}}}+\frac{1}{\sqrt{Z_{v2}}}+\cdots+\frac{1}{\sqrt{Z_{vi}}}\right)^2}$	$R=\frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_i}}$

风路中的阻力并非严格地保持为一常数，有若干阻力系数不仅取决于尺寸和几何形状，而且还取决于各支路中流量分配和流动状态，即风阻 Z_v 与流量 Q 之间存在一定的函数关系。严格地说，沿程阻力系数也与 Q 有关。这就给通风系统计算带来一定的复杂性。为此，计算时要做一些简化，近似认定它为常数，并把系统中的阻力集中成几个单一阻力元件，并进行简化归并，见表 1.6-14 中的等效风路。

对一些简单的通风系统，可用简单的串并联归并进行计算。但大部分风路都是纵横交织的，很难以简单的串并联归并来进行计算，这就必须引入其他方法，如迭代逼近法、解流体网络等，这些都是计算机技术飞速发展的结果。其中商业软件 FLOWMASTER 是在电机通风设计中应用得比较好的。

5.4.4 FLOWMASTER 商业软件简介

FLOWMASTER 是德国一家流体工程中心 BHRA 制作的商业软件，它的基础是流体非线性网络的求解与流体网络系统的各种器件的实测流阻特性的结合。可以说它是把他们中心的一切关于流体、流阻元件、压力元件的研究、试验结果作为一个数据库，在计算机软件中集中体现出来。从流体力学角度讲，它包括可压及不可压缩流体两种，可进行流体的稳态和瞬态分析及流体动力学计算。它前处理采用的是交互式人机对话的流体网络，此网络在计算机屏幕上显示，同时显示各元件的名称，可在支路及节点的输入表格中输入数据，更直观、更具体，改动方便。当然通过文件（FNDA）也可直接完成网络的数据输入。网络求解中利用压力与流量的二次方关系，转化为流量与压力的隐函数关系，运用支路流量分析，对各节点流量进行迭代、求解。后处理可以把得到的结果根据需要直接写到各节点、支路上。同时可绘出各种类型的图，显示方便、清晰、易于理解。

用于通风计算的网络建立都是基于发电机的通风结构，在 FLOWMASTER 上可利用工具条直接把相应于发电机风阻的模拟元件画在屏幕的相应位置上，再通过连接等工具键把各元件连接在一起，就形成了通风网络图，通过各元件的数据输入单就可把元件数据输入到网络中去，就准备好可进行网络求解了。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

5.4.5　通风系统的数值计算

非定常可压缩 N—S 方程组，是描述可压缩黏性流体运动的最完整的方程组。当求解时间推进到稳定状态时，可以得到定常可压缩 N—S 方程的解。人们在求解可压缩性 N—S 方程中已经发展了许多成熟的数值方法。电机中流体为不可压流体，求解时需要解决动量方程的解满足连续方程的问题，采用人工压缩性等求解方法，就此可以使用现有的可压缩性数值求解方法。对于不可压缩流动，密度为常数，能量方程可以忽略，主控方程为连续方程和动量方程。

在电机中可以采用整个电机的流体空间作为计算区域，采用数值方法直接求解 N—S 方程求得电机空间内的压力分布、流速分布及流量分布。由于此种方法计算量大，非常烦琐，计算结果精度提高的不是很明显，发展的还不是很成熟，工业应用受到限制。

应用数值解法还可以对电机内某些关键部位进行场域求解，如电机定子通风沟、转子磁极极间部分。图 1.6-8 为三峡发电机散热匝极间流体模型，图 1.6-9 为三峡发电机散热匝三维流场速度分布。

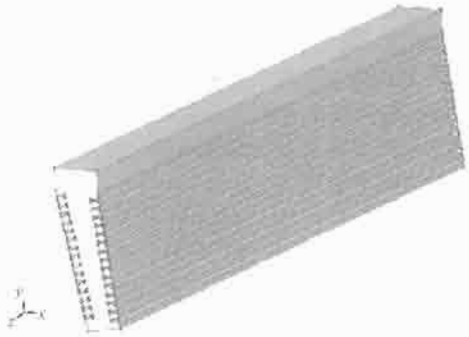


图 1.6-8　三峡发电机散热匝极间流体模型

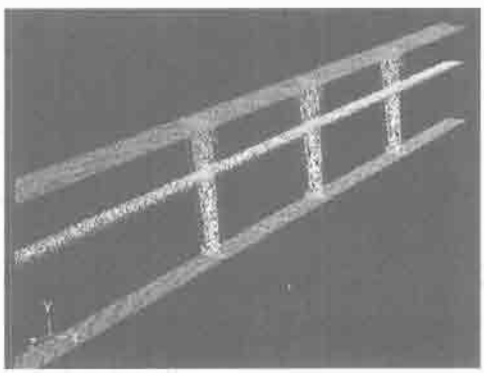


图 1.6-9　三峡发电机散热匝三维流场速度分布

5.5　蒸发冷却及其在电机中的应用

5.5.1　定子绕组（内冷）自循环蒸发冷却机理

（1）热力学及流体力学基础

定子绕组空心导体的自循环蒸发冷却是从低温（制冷）强迫循环蒸发冷却演变为常温强迫循环蒸发冷却的基础上，结合立式水轮发电机的特点而发展起来的。

绕组空心导管内通以液体介质，吸热沸腾，利用气化潜热，冷却电机，蒸汽经冷凝恢复成液体而循环使用。从热力学角度看这个过程，若蒸发吸热时的温度 T_1 低于冷凝温度 T_2，蒸汽必须经过压缩升压，提高冷凝温度，才能用自然水或空气作为二次冷媒进行热交换，使蒸汽冷凝成液体，保持制冷循环［见图 1.6-11（a）］，压缩机需做功 $A_w=(i_2-i_1)G$。式中，G 为循环蒸发量；冷凝放热量为 $q_h=(i_2-i_3)G$；绕组散热量为 $q_0=(i_1-i_4)G$。式中，i_1、i_2、i_3、i_4 分别为 1～4 各点冷却介质焓量。如果提高一次冷却介质的蒸发温度 T_1，使之高于冷凝温度 T_2［见图 1.6-10（b）］，使运行温度高于二次冷却媒质的温度，汽化后的介质不必经过压缩升压，就可通过热交换使之冷凝，这就是常温强迫蒸发冷却的概念。用液泵提供压头克服流动阻力损失，就可完成循环。显然液泵的功率要比压缩泵小得多。这种管内强迫循环蒸发冷却方式，在电机定子绕组上均可使用，原理相同。

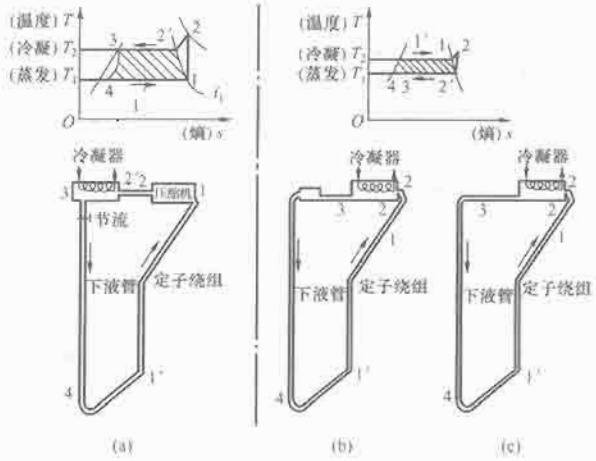


图 1.6-10　蒸发冷却应用于水轮发电机的原理演变
（a）低温（制冷）强迫循环蒸发冷却；（b）常温强迫循环蒸发冷却；（c）常温自循环蒸发冷却

常温管内蒸发冷却应用到水轮发电机上，利用了立式结构特点，各流体支路分布基本相同，试验证明可以取消循环液泵，实现自循环。因为它的热力循环是属于热机型的，介质吸收的热量大部分由冷凝器带走，但可以利用其中少量热能做功，形成自循环。从热工角度看，蒸发吸热是在相对较大的压力下进行，而冷凝放热是在相对较低压力下进行，介质饱和焓值的差别是形成自循环的热动力。

从流体流动的角度看，因为下液管中的液体密度 ρL 大于绕组中蒸发造成的两相流体混合密度 ρ_{mix}，在重力场作用下，产生的压差就是自循环的动力 PP，称为循环流体压头。这个压头克服全回路的阻力 $\Sigma\Delta P=\Sigma\Delta PL+\Sigma\Delta PTPF$，它是全部液体与两相流阻之和，使流体自动循环，蒸发吸热冷却电机。

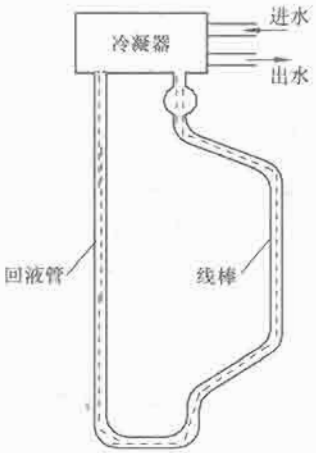


图 1.6-11　蒸发冷却自循环回路

因此，从热力循环和流体力学原理看，介质自身吸热后沸腾相变而产生自循环，理论上是可行的。

（2）定子绕组蒸发冷却自循环回路的结构及原理

一个封闭自循环冷却系统由冷凝器、回液管、下集液管、具有空心导体的线棒、上集汽管、出汽管及套管接头等部件构成，内部充有冷却液。每条支路的结构如图 1.6-11 所示。

电机运行后，线棒会产生损耗热量，空心导体中冷却介质吸收热量，温度逐渐升高，达到压力所对应的饱和温度时冷却液变成蒸汽，在空心导线里形成汽液两相混合

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

物。汽液两相混合物的密度小于单相液体的密度，这样回液管中冷却液产生的重力压头比线棒空心导体中汽液两相混合物产生的重力压头要大，产生压差，推动冷却介质循环运动，汽液两相混合物出了线棒空心导体上端口进入上集汽管，再经过出汽管进入冷凝器，在冷凝器里将热量交换给二次冷却媒质，由二次冷却介质将热量带走，汽态的冷却介质回复到液态，液态的冷却介质出冷凝器进入回液管，又经由下集液管进入线棒的空心导线里，如此周而复始地进行冷却循环。

(3) 定子绕组自循环蒸发冷却回路的分析与计算

1) 单相流阻的计算。水轮发电机蒸发冷却回路中回液管、下集液管、线棒未蒸发段里都是单相流阻，它包括沿程流阻和局部流阻。

沿程阻力计算为

$$P = \zeta l \omega^2 / D \qquad (1.6\text{-}9)$$

式中，ζ 为摩擦系数，层流时 $\zeta = 64/Re$，紊流时 $\zeta = 0.3164/Re^{0.25}$。对于管内径 D 有一点要说明：计算式中 D 是指圆管内径，而电机线棒的空心股线是矩形的，因此计算中要采用水力等效直径 $D = 2xy/(x+y)$(式中 x 和 y 指矩形的长和宽)。

局部阻力计算为

$$P' = \zeta' r \omega^2 / 2 \qquad (1.6\text{-}10)$$

式中，ζ' 为局部阻力系数；r 为流体的密度；ω 为流体的速度；按管道截面突然收缩、管道截面突然扩大和管道弯曲处等情况求解。

2) 蒸发点位置。在受热均匀的管内，流动的液体吸引热量达到了饱和温度就开始沸腾，沸腾的地方称为蒸发点，是区分液相和二相的分界点。根据热量平衡式 (1.6-11)(见图 1.6-12) 并简化得

$$L_x = (i_a - i_0) GL / Q \qquad (1.6\text{-}11)$$

式中，i_a 和 i_0 流体的饱和焓和实际焓；G 为循环质量流量；Q 为线棒损耗热量；L 为线棒长度。在实际计算时 i_a 和 i_0 都不知道，因此需假定入口 a 处的压力和温度，多次循环迭代计算使假定值满足要求。

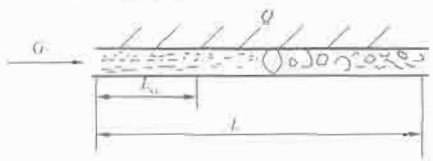


图 1.6-12 蒸发点位置

3) 二相流阻的计算。二相流阻的计算方法大多属于半理论半经验公式，在特定的二相循环流动系统上使用时，均需要校核修正。论文采用半经验半理论的美国马丁尼里-纳尔逊公式（简称 M—N 公式），结合电机具体结构而对 M—N 做的大量校核结果进行计算，为简化一些复杂问题，计算前先作如下假定：

①认为两相流动为分相模型。

②汽液两相沿管保持热力平衡。

③冷却介质沿管长受热均匀，连续蒸发，蒸汽品质 X_e 线性地变化。

④汽液两相速度沿管分为常量。

M—N 两相流阻计算式为

$$(dp/dL)_{TPF} = \varphi^2 (dp/dL)_L \qquad (1.6\text{-}12)$$

式中，$(dp/dL)_{TPF}$ 为微分段两相流流阻；φ 为放大倍数，是另一个参数 X_{tt} 的函数，试验中得到了 φ 与 X_{tt} 的关系曲线如图 1.6-13 所示。参数 X_{tt} 的计算式为

$$X_{tt} = (V_L/V_g)^{0.571} (S_L S_g)^{0.143} (1/X_e - 1) \qquad (1.6\text{-}13)$$

一些文献供认，两相段的局部流阻和沿程流阻一样均先以单相计算然后相乘以同一特定的放大倍数，其结果是满意的，在计算中袭用这一点。

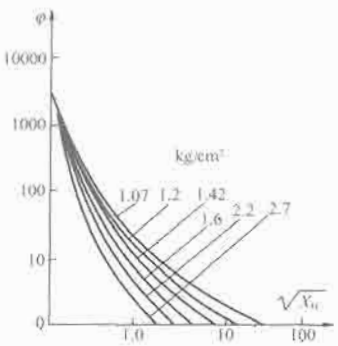


图 1.6-13 φ 和 X_{tt} 的关系曲线

上集汽管和出汽管部分：

X_e 不变的情况下，可对式 (1.6-12) 两边对长度上进行积分，可得

$$p_{TPF} = \varphi^2 p_L \qquad (1.6\text{-}14)$$

根据式 (1.6-13) 先计算出 X_{tt} 的值来，利用 X_{tt} 和 φ 的关系(见图 1.6-14) 再求出放大倍数 φ 的值。对于非线性曲线的处理是采用拉格朗日插值算法编程序由计算机去计算。

蒸汽品质 X_e 线性地变化，因此不能直接采用式 (1.6-14) 来计算线棒蒸发段的两相流阻。式 (1.6-12) 中的 $(dp/dL)L$ 指的是两相流的微分段里除去汽相其液相的单相流阻，现将它与尚未蒸发时全部液体通过蒸发段时的单相流阻相联系，建立的关系式为

$$(dp/dL)L = (dp/dL)0(1 - X_e)^{1.75} \qquad (1.6\text{-}15)$$

将式 (1.6-15) 代入式 (1.6-12) 可得

$$(dp/dL)TPF = (1 - X_e)^{1.75} \varphi^2 (dp/dL)0 \qquad (1.6\text{-}16)$$

由单相流阻计算式可见，式 (1.6-16) 中 $(dp/dL)\ 0$ 可认为是一个常数，这样计算式变成

$$p_{TPF}/p_0 = \int_0^{L} (1 - X_e)^{1.75} \varphi^2 dL \qquad (1.6\text{-}17)$$

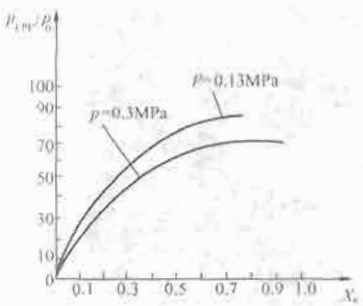


图 1.6-14 曲线图

计算式 (1.6-17) 的右边是在蒸发段内某一平均压力下，某一出口蒸汽品质时的放大系数平均值。中国科学院电工研究所采用 X 射线衰减法对矩形有机玻璃管内蒸发两相流动和对矩形空心铜线内的蒸发两相流动这二者的出口蒸汽品质 X_e 及其相对应的放大倍数平均值进行了试验测定，得到了蒸汽品质和放大倍数平均值在不同压力下的关系曲线如图 1.6-14 所示，但实验时所使用的介质是 F-11，而现今试验和计算用的介质是 F-113，因此，要加修正系数。

这里有一点要提一下的是由于定子线棒的股线之间的换位而产生的局部流动阻力，采用的换位方式是槽部 360°换位、端部不换位的线棒 (0°/360°/0°)，换位引起的流动局部阻力像管道弯曲处的局部阻力那样计算。

流动压头的计算：

回液管、下集汽管和线棒未蒸发段里是单相冷却介质在流动，其流动压头的计算式为

$$F = Lr \qquad (1.6\text{-}18)$$

而上集汽管、出汽管和线棒的蒸发段里是冷却介质的汽液两相混合物，混合密度计算甚为困难。对于上集汽管和出汽

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

管，其内流动的蒸汽品质一定，汽液比例一定，而在线棒的蒸发段里冷却介质不断蒸发，汽量不断增多，二者的混合密度的计算式为

$$rcm = (1-b)r_L + br_g \qquad (1.6\text{-}19)$$

问题变成了求汽量所占截面的比率，论文利用实验结果求汽所占截面的比率。中科院电工所最初利用快速机械夹制法测定了圆管内冷却的 b 值，后来用 X 射线衰减法测定了矩形有机玻璃管内的 b 值，得到了汽液比例一定的管内汽液混合物在蒸汽品质不同时的 b 值，如图 1.6-15 所示。线棒的蒸发段内，中科院电工所对矩形空心铜管的蒸发两相流动的 b 值进行了测定，通过实验数据的整理，得到了出口蒸汽品质不同时的蒸发两相段的汽占截面比率的平均值曲线表，非线性曲线采用拉格朗日插值算法。

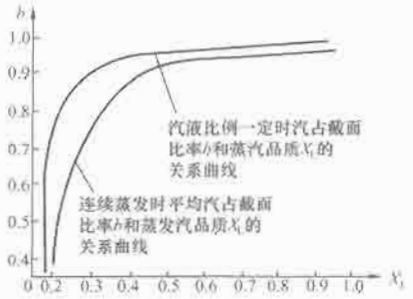


图 1.6-15　关系曲线图

4）管内蒸发冷却计算框图，如图 1.6-16 所示。

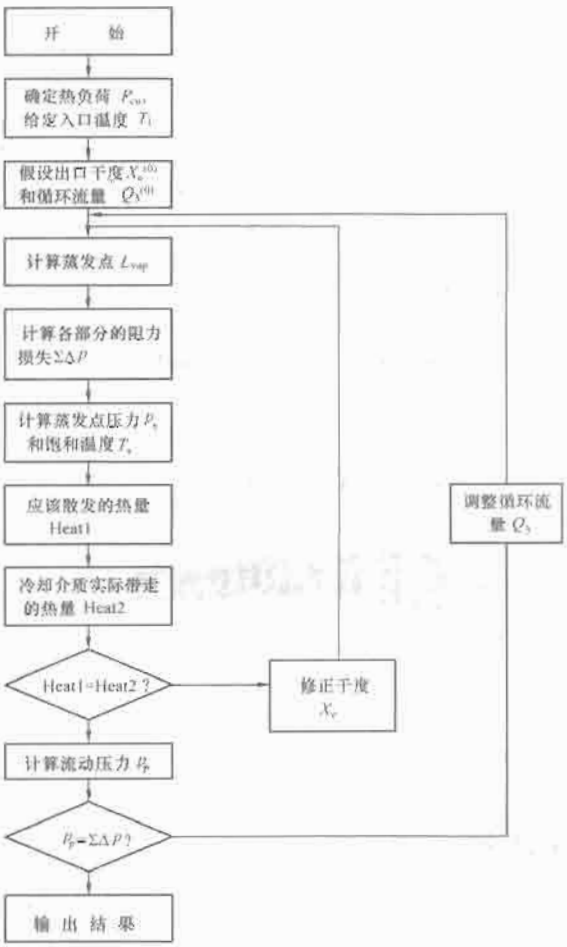


图 1.6-16　管内蒸发冷却框图

5.5.2　蒸发冷却试验

蒸发冷却技术主要研究蒸发冷却回路的设计。一是设计适当的冷却液体流量（主要是过流面积），二是冷却液体的液面高程。当然这两个问题不是完全割裂的。第一个问题相应于线棒电流密度的选择及最佳过流面积设计。为此就要求对具有不同内孔尺寸的线棒进行实验研究，同时对整个线棒进行温度分布测量。第二个问题主要是研究冷却流体的沿程阻力（包括冷却液的单相阻力及蒸发段的二相阻力）、蒸发点位置及蒸发段各处的液气比。众所周知，对于流体的计算精度不可能很高，在研究中多半要伴有试验研究及验证。因此，除进行必要的理论分析外，还需建立一个试验台，以保证研究成果的科学性、精确性和应用性。

为更好地发挥和挖掘蒸发冷却的能力，试验台设计成具有负荷为 800～1000MW 水轮发电机的试验能力。

（1）试验台的总体布局

蒸发冷却试验台供电系统尽量设计与真机相同，采用三相交流。电流测量采用交流互感器，以消除温度对测量的影响。试验用模型线棒采用与三峡真机相同的线棒和外形（包括绝缘层），使等效的发电机容量达到 800MW 及以上。试验台能进行多种空心导线规格的模型线棒试验。蒸发冷却试验台总体包括以下 5 部分组成：试验台架、冷却介质循环系统、可调压的大电流（最大电流达 8500A）的电气系统、参数测量系统（160 路测量通道）、冷却水循环系统。

1）试验台架。整个试验装置安装在一长 3.2m、宽 1.5m、高 6.5m 的试验台架上。试验台架中间设 2 个平台，用于固定试验线棒。2 个冷凝器安装在最高层，集汽管及 2 相流三通控制阀等安装在上平台以上，集液管及液态单相流三通控制阀等安装在下平台以下。试验台架背板上面安装有测量罐，其高度可调整，设有专用的流量测量平台。

2）冷却介质循环系统。线棒中的冷却介质在线棒损耗热的作用下，蒸发成气体，与未蒸发的介质形成 2 相流。在不同密度的液柱压差作用下，2 相流冷却介质流入集汽管，各线棒的 2 相流介质汇集一起共同流入冷凝器。在冷凝器中蒸发后的介质从汽态重新液化为液态，从回液管流回集液管再分别流入各线棒中，完成一个冷却循环。本试验台可完成 3 种循环。一为各线棒独立循环；二为 6 根不同内孔尺寸的铜空心线组成的联合循环；三为 6 根三峡真机线棒不锈钢空心线的联合循环。

3）试验线棒。试验线棒一种是三峡线棒，另一根是内部为不同尺寸的铜空心导线及电磁线，可分别进行试验。其中三峡线棒有 5 根是真机线棒，一根是沿轴向均布测温热电偶（22 点）的三峡真机线棒。另一根具有不同尺寸的空心铜线，其宽度与三峡真机空心不锈钢线相同，壁厚为 1.3mm，孔内高度分别为 2.0mm、2.1mm、2.2mm、2.3mm、2.4mm、2.5mm 6 种。电磁线的高度随空心线的不同作相应变化，以保证线棒的总厚度与三峡真机线棒相同。为能反映电机的真实情况，电磁线及空心不锈钢线（空心铜线）与真机线棒一样进行换位。同时为保证其绝缘性能与三峡线棒相同，线棒外绝缘材料及尺寸与三峡线棒的相同。

4）可调压的大电流电气系统。供电系统由调压器、大电流变压器、连接铜排、大电流互感器、线棒组成。线棒分为 2 组，并联供电。

5）参数测量系统。参数测量系统由 KETHLELY 公司的数字多用表/数据采集系统组成，能同时测量多达 160 通道热电偶值（mV 级）、或电压信号（0～5V）值。在计算机的控制下完成测试工作。

6）冷却水循环系统。冷却水循环系统由水罐（包括上

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

水管路、下水管路）、阀门、水泵、流量计、水管路、冷凝器等组成。

图 1.6-17 为建成后的蒸发冷却试验台照片。



图 1.6-17 蒸发冷却试验台

（2）蒸发冷却试验台的运行试验结果

1）6 根不同尺寸的空心铜线组成的线棒进行独立蒸发循环试验。在蒸发冷却试验台上，有 6 根由不同尺寸的空心铜线和电磁线组成的线棒，其外形、绝缘厚度与三峡左岸真机线棒的相同。在它们的上、下两端冷却介质回路上分别接有三通阀门。试验前确定阀门的导通方向，线棒上面的阀门与各独立冷凝器接通，下面的阀门与独立冷凝器的回液管方向接通。调整回液管上小测量罐的高度至所需位置进行试验。图 1.6-18 为空心导线内孔高度为 2.1mm 全液位高度的温度测量结果。

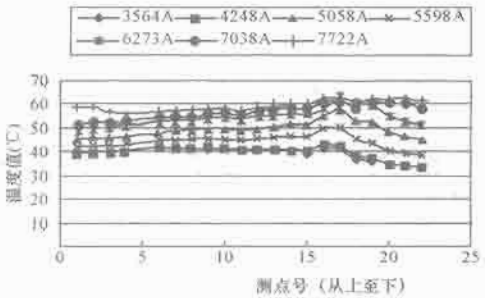


图 1.6-18 空心导线内孔高度为 2.1mm 的全液位高度的温度测量结果

从图 1.6-18 中可看出，位于线棒下端的 22 测点温度最低，17 测点或其左右处为蒸发点，温度最高。蒸发点以上冷却介质的沸点温度随 2 相流压力的减小而降低，线棒的温度也同时随介质的沸点温度降低而降低。冷却液面为全液位高（100%直线长）时，2.1mm 厚的空心线在 7722A 时为临界点，大于此电流时将会出现过热现象。

2）6 根不同尺寸的空心铜线组成的线棒进行联合蒸发循环试验，在蒸发冷却试验台上，有 6 根由不同尺寸的空心铜线和电磁线组成的线棒，其外形、绝缘厚度与三峡左岸真机线棒的相同。在它们的上、下两端冷却介质回路上分别接有三通阀门。试验前确定阀门的导通方向，线棒上面的阀门与集汽管接通，下面的阀门与集液管方向接通。试验前关闭大冷凝器至三峡真机线棒系统的回液阀门，打开大冷凝器至模拟线棒系统的阀门。调整联合循环主回液管上大测量罐的高度至所需位置。图 1.6-19 为空心导线内孔高度为 2.1mm 全液位高度的温度测量结果。

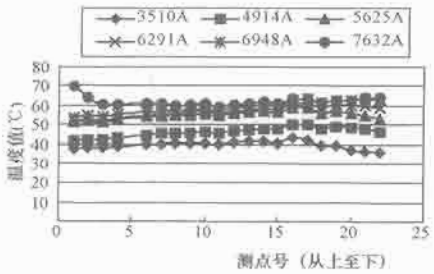


图 1.6-19 空心导线内孔高度为 2.1mm 全液位的温度测量结果

从图 1.6-19 中可看出，在冷却液面为 98%直线段长时，2.1mm 厚的空心线在 6948A 时没出现过热现象，大于 7632A 时出现了过热现象。

从上述试验可知：蒸发冷却规律在联合循环中与独立循环中是一样的。

3）三峡左岸真机线棒的蒸发冷却试验。在试验台上安装 6 根三峡左岸的真机线棒，其中 5 根与三峡左岸真机线棒完全相同，另外一根在外形、材料、结构上也与三峡左岸的完全相同，只是在线棒的长度方向上每隔 200mm 在同一根不锈钢扁水管上埋设一根热电偶，共埋设 22 根热电偶。另外，在第 16、17 号热电偶的同一截面上，在 4 根电磁线的中间各埋设了一个热电偶。共埋设了 24 根热电偶。试验前，改接三峡真机线棒系统的中性点部分，断开模拟线棒部分的中性点连线。关闭大冷凝器至模拟线棒系统的回液阀门，打开大冷凝器至三峡真机线棒系统的阀门。

调整好大测量罐位置后，冷却液灌至需要的高度。试验开始后在冷却介质蒸发时，打开大冷凝器上的排气阀排气。试验过程中监视冷凝器的压力及线棒上的最高点温度，同时监视冷凝器的水流量。根据不同的要求对不同的液位进行了多电流工况的试验。由于试验采用的是三相供电方式，存在三相电流不平衡的问题，因此，各线棒的电流值不等。图 1.6-20 为三峡真机线棒在全液位的温度测量结果。

从图 1.6-20 中可看出，在冷却液面为 98%直线段长时，三峡真机线棒在 6678A 以下时不会出现过热现象。

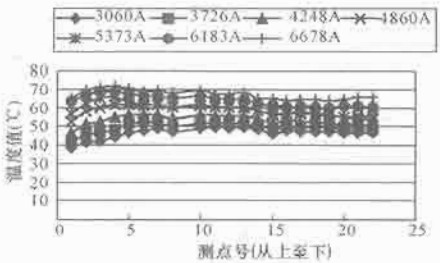


图 1.6-20 三峡真机线棒在 98%直线长液位的温度测量结果

6 电机的综合热计算

电机综合热计算的目的在于，根据电机各部分损耗、冷却系统，求解电机各部分的温升。计算方法有常规的等效热路法和数值解法。

6.1 等效热路法

根据电机的实际结构，将电机的各主要热源（损耗）集

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

中于一点，各部分热阻用平均值代替，按实际热流路线，组成等效热路图。图 1.6-21 为一台大型水轮发电机定子的热路图。图 1.6-22 为计算励磁绕组及阻尼绕组温升的热路图。

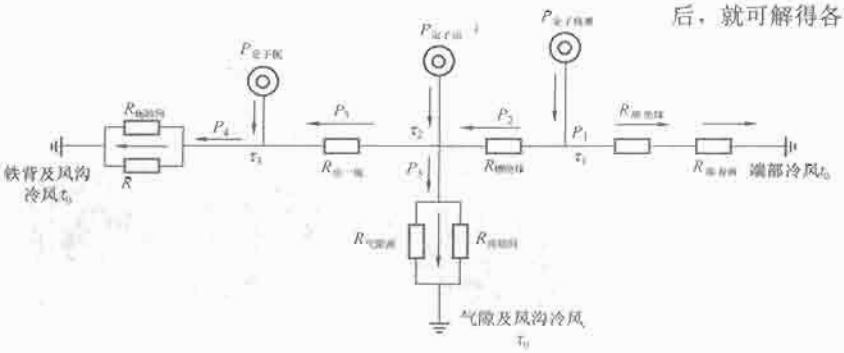


图 1.6-21　水轮发电机定子热路图

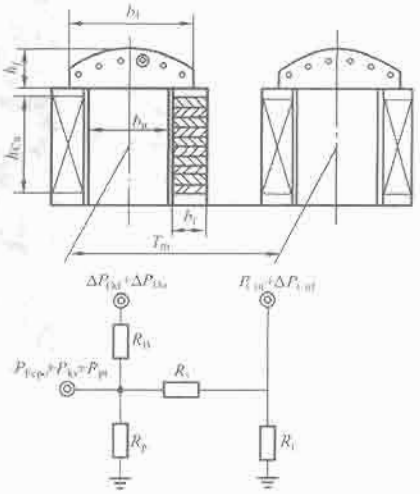


图 1.6-22　计算励磁绕组及阻尼绕组温升的热路图

计算步骤如下：

1）根据电机结构尺寸、电磁参数，计算各部件热阻 R_i 和热负荷（即损耗或热流量）P_i。

2）选取一个热源 P_j，并假定其他热源不存在的条件下，利用热阻的串并联关系，求出各热阻上的热流 P_{ij} 的大小和方向。

3）求出流经各热阻上热流 P_{ij} 的代数和 $\sum_{j=1}^{n} P_{ij}$。

4）利用各热阻的大小和热流 $\sum_{j=1}^{n} P_{ij}$，求出各热阻两端的温差 $\Delta T_i = R_i \sum_{j=1}^{n} P_{ij}$。

5）根据各热阻上的温差、边界温度，求出定子线圈的温度或温升。

6.2　二维稳定导热的数值解法

在电机温度分布计算中，二维场—平面导热问题有广泛的实用价值。如分析槽内导线最热点，合理布置内冷导管及检温元件；分析铁心横截面温度分布，合理布置轴向风道；分析主极线圈温度分布，合理选择主极线圈分层结构等。大量工程实践证明，正确地分析二维温度场，可以合理解决电机的许多发热及冷却问题。

假定电机的温升沿圆周分布对称，截出铁心（包括线圈）的一段作为计算单元，如图 1.6-23 所示。在单元内，假定热流和温度只在平面内变化。按计算精度要求，做出平面上的节点网络图，如图 1.6-24 所示。建立平面上各节点温度间的线性关系的代数方程，当给定边界上节点温度值后，就可解得各节点的温度数值。

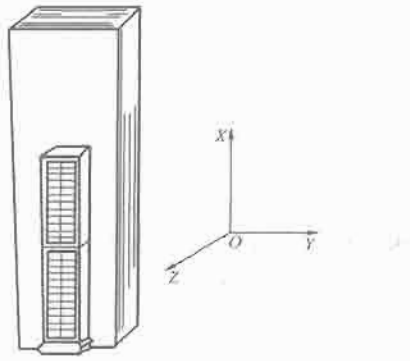


图 1.6-23　典型电机定子的传热单元结构

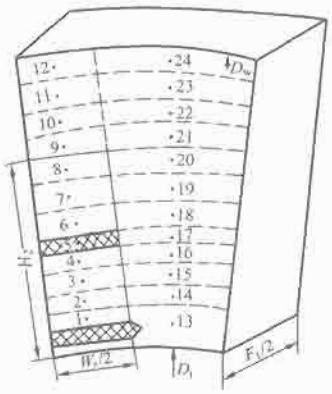


图 1.6-24　定子二维热网络图

6.3　水轮发电机温度场计算

6.3.1　稳态温度场的条件变分问题

按傅里叶热传导定律，物体内单位时间内通过单位面积所传递的热量与物体内的温度梯度成正比

$$q = -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) \tag{1.6-20}$$

式中，q 为单位时间内沿法线方向通过导热面积的热流量，即热流密度向量；$\frac{\partial T}{\partial n}$ 为导热面温度法向的变化率；λ 为热导率。

固体内部导热时，由热力学能量守恒定律：在一定时间内，一体积元内所产生的热量 Φ_1，应等于同一时间内从这个体积元表面传导出去的热量 Φ_2 与留在该体积元内的热量 Φ_3 之和，即

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_3 \tag{1.6-21}$$

应用微元分析法，即可得到有内部热源时，在各向异性介质的固体中的热传导方程

$$\mathrm{div}(\lambda \mathrm{grad} T) + q_v = \rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) \tag{1.6-22}$$

式中，q_v 为单位体积内产生的热量；ρ 为空气密度；c 为空气比热容。

对于稳态温度场，温度 T 不随时间 t 变化，即 $\frac{\partial T}{\partial t}=0$，于是式（1.6-22）变为

$$\mathrm{div}(\lambda \mathrm{grad} T) + q_v = 0 \tag{1.6-23}$$

在直角坐标下，各向异性介质中的三维稳态热传导方程

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)=-q_v \tag{1.6-24}$$

为了确定物体内的温度分布，还必须给定适当的边界条件，常见的温度场边界条件可分为三类：

1）温度边界条件（第一类边界条件）。若在边界 Ω_1 上温度是给定的，称为温度边界条件。

$$T(x,y,z)\big|_{(x,y,z)\in\Omega_1}=T_G(x,y,z) \tag{1.6-25}$$

2）热流边界条件（第二类边界条件）。若在边界 Ω_2 上热传导为定值 q_0，即沿该边界的法线方向温度梯度为给定值，称为热流边界条件；特别的，当 $q_0=0$ 时，也就是在边界面 Ω_2 上没有热传导，称为绝热边界条件。

$$\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial n}\bigg|_{(x,y,z)\in\Omega_2}=q_0 \tag{1.6-26}$$

3）热交换边界条件（第三类边界条件）。在边界 Ω_3 上从物体内部传到边界上的热功率，应等于通过边界散到周围介质中的热功率。

$$\alpha[T(x,y,z)-T_f]\big|_{(x,y,z)\in\Omega_3}=-\lambda\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial n}\bigg|_{(x,y,z)\in\Omega_3} \tag{1.6-27}$$

式中，α 为表面散热系数；T_f 为周围介质温度。

从而由以上方程组成了稳态三维温度场的边值问题

$$\begin{cases}\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \dfrac{\partial T}{\partial x}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \dfrac{\partial T}{\partial y}\right)+\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \dfrac{\partial T}{\partial z}\right)=-q_v\\ \Omega_1: T=T_G\\ \Omega_2: \lambda\dfrac{\partial T}{\partial n}=q_0\\ \Omega_3: \lambda\dfrac{\partial T}{\partial n}=-\alpha(T-T_f)\end{cases} \tag{1.6-28}$$

相应于式（1.6-13）等价的泛函为

$$I(T)=\iiint_v\left[\frac{\lambda_x}{2}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2+\frac{\lambda_y}{2}\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2+\frac{\lambda_z}{2}\left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right)^2-q_v T\right]\mathrm{d}v-\iint_{\Omega_2}q_0 T\mathrm{d}s+\iint_{\Omega_3}\frac{\alpha}{2}(T^2-2T_f T)\mathrm{d}s \tag{1.6-29}$$

$$\Omega_1: T=T_G$$

6.3.2 定、转子三维温度场计算

（1）定子温度场计算基本假设

1）考虑定子绕组铜损耗时，认为涡流效应对每根股线的影响相同，即取其平均值。

2）把槽楔及导线外的绝缘认为是同一种物质。

3）端部绕组在鼻端啮合处认为没有热交换，可做绝热面处理。

4）端部只考虑绕组部分。

（2）转子温度场计算基本假设

1）磁极铁心段沿轴向的中心面为绝热面。

2）认为从转子磁轭通风沟出来的风，其风速从端部到铁心段中部是线形递增的。

3）认为在极靴表面由端部输入的风，其风速由磁极端部到铁心段中部沿圆周方向是线形递增的。

4）认为转子磁极的端部为一平面。

目前，商业软件中使用效果比较好的是 ANSYS 温度场计算软件，图 1.6-25 所示为龙滩电站 700MW 发电机定子温度场计算结果，图 1.6-26 所示为龙滩电站 700MW 发电机转子温度场计算结果。

从对电机各部分的温度分布计算中可看出，定子线圈最热点温度为 107.79℃，最热点温度处在中间铁心段的齿根部，轭背部及齿顶处温度较低，这与电机的真实温度分布是相符的。转子最热点温度为 110.61℃，转子迎风面温度较背风面温度略低，这与真机的实际运行情况是相符的。

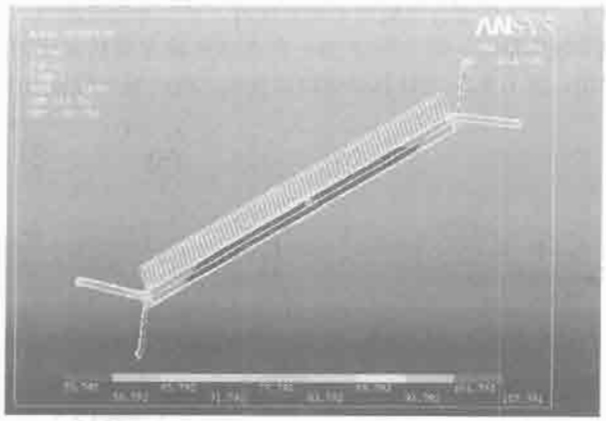


图 1.6-25 龙滩电站 700MW 发电机定子温度场计算结果

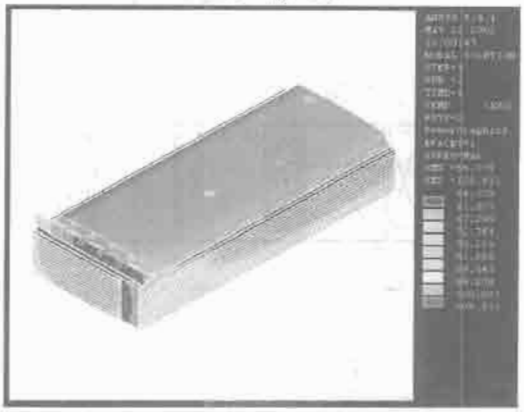


图 1.6-26 龙滩电站 700MW 发电机转子温度场计算结果

7 风扇及其选用

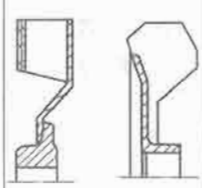
风扇是电机的附加压头元件。它与转子旋转的压头作用共同维持电机所需风量，对电机进行冷却。通常选用风扇的条件是：

1）按比转速 n_y 选用，一般 $n_y>1000$ 时，选用轴流式风扇，否则选择径向风扇。

2）按电机实际风路的需要，合理选择风扇尺寸和安装位置，达到总风量适当，分配合理。

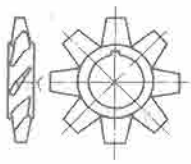
3）设计风扇及相应挡风板时，使其效率高，噪声低，运行可靠，检修方便。常用风扇的型式和特点见表 1.6-16。

表 1.6-16 电机常用风扇的型式及特点

型式	示意图	特点与适用范围		机械效率 η_M	叶片气体动力效率 η_H
离心式		垂直叶片	风压较高，工艺简单，转向可逆，用于一般中小型电机	0.15～0.20	0.60
		前倾叶片	风压高，转向不可逆，适用于低速电机	0.30～0.40	0.75
		后倾叶片	风压较低，转向不可逆，适用于高速大中型电机	0.25～0.30	0.50

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

型式	示　意　图	特点与适用范围	机械效率 η_M	叶片气体动力效率 η_H
轴流式		风压低，风量大，转向不可逆，成本较高，适用于需要大风量的高速电机	0.50～0.60	

7.1　轴流式风扇

轴流式风扇的断面如图 1.6-27 所示。气流在风扇的入口和出口处速度不同，产生轴向压力差，使气流获得能量。

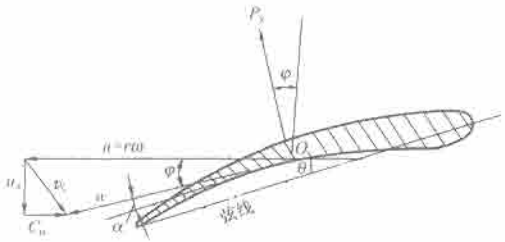


图 1.6-27　翼片气流的速度

基本计算公式如下：

1）轴向速度

$$v_0 = \frac{Q_0}{A_0} \quad (\mathrm{m/s})$$

2）理论压头

$$H = \rho \frac{w^2 ib}{\pi D_{av}} (C_y \cos\varphi - C_x \mathrm{din}\varphi) \quad (\mathrm{N/m^2})$$

3）流量压头特性

$$H = f_0(Q_0)$$

式中，w 为合成速度，m/s；Q_0 为流量，m^3/s；A_0 为入口面积，m^2；b 为叶片宽，m；ρ 为气体密度，kg/m^3；i 为叶片数；D_{av} 为平均直径，m；φ 为安装角（°）；C_y、C_x 为升力、阻力系数，一般由试验确定。

7.2　离心式风扇

离心式风扇带动进入叶片间的气流旋转，使其获得能量，并使气流从入口沿径向流向出口。

基本计算公式如下：

1）空载压头

$$H_0 = K_{H\varphi}(v_2^2 - v_1^2) \quad (\mathrm{N/m^2})$$

2）最大流量

$$Q_{max} = K_q A_{ex} v_2 \quad (\mathrm{m^3/s})$$

3）相对压头流量特性

$$\frac{H}{H_0} = 1 - \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2$$

式中，K_H、K_q 为压头、流量系数，由试验求得；v_1、v_2 为风扇内缘、外缘圆周速度，m/s；A_{ex} 为风扇出口面积，m^2。

除上述两种型式风扇外，还有斗形风扇、括板风扇、弧斗形风扇、子午线形风扇等，在中小型电机中是比较常见的。它们的工作原理与离心式风扇的类似。

8　冷却器及其选用

在采用封闭循环通风系统的电机中，热量由一次冷却介质带出，经冷却器由二次冷却介质冷却，使其温度降到规定的数值以下，再进入电机内部继续带出热量，如此不断循环。

电机的冷却器通常有三种：即气体-气体冷却器、气体-水冷却器、水-水冷却器。第一种常用于大型交流电机的封闭式循环通风系统，第二种用于大型汽轮或水轮发电机，第三种主要用于水冷发电机。无论哪一种冷却器，它们的换热机理是相同的，只不过随着介质匹配不同，流体表面的传热系数不同，最终反映出总传热系数不同。

8.1　冷却器中流体的流动方式

冷却器中流动的冷热两种流体，由平壁或圆管相互隔开，进行热交换。两种流体的布置，有顺流、逆流和叉流三种型式，如图 1.6-28 所示。

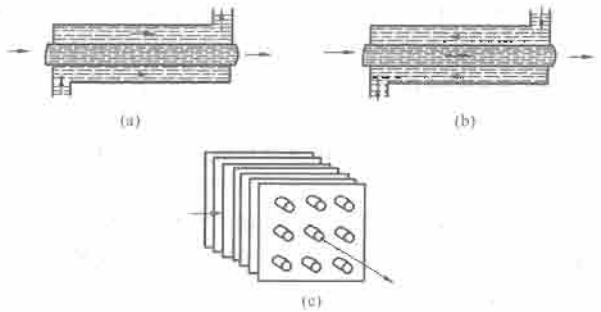


图 1.6-28　两种流体的布置型式
（a）顺流；（b）逆流；（c）叉流

为了提高冷却器的换热能力，使两种流体合理匹配，结构上往往使放热系数小的一侧表面上加筋，以增加散热面。筋的型式常有复合管式、铜挤片式、针刺式、椭圆管式、穿片式等，其冷却组件单元如图 1.6-29 所示。

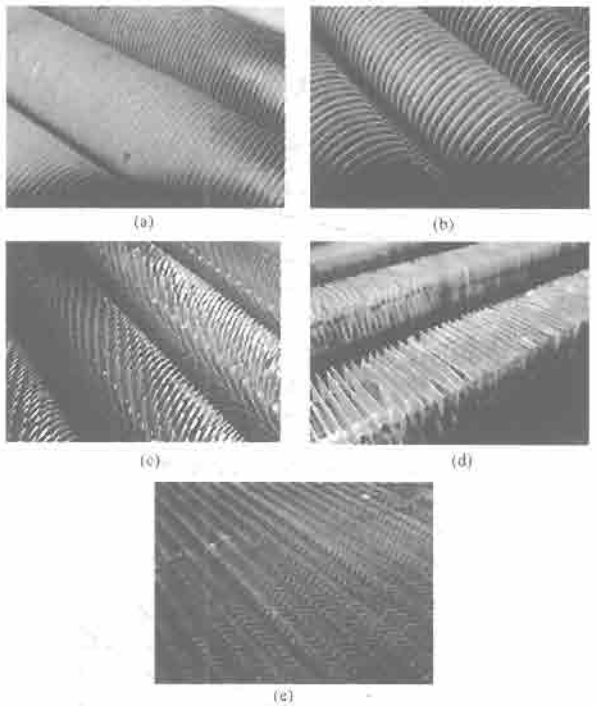


图 1.6-29　水-空冷却器冷却组件
（a）复合管式；（b）铜挤片式；（c）针刺式；（d）椭圆管式；（e）穿片式

8.2　气体-水冷却器

电机常用气体-水冷却器的冷却管的结构和性能见表

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

1.6-17，表1.6-17中的套片扩管式冷却器是由散热管和多层波形薄铜（也可用铝）板穿插成型的一种整体组合新结构。它整体刚性好、抗振、省水、风阻小、散热性能好，目前已在大型电机中推广应用。

气体-水冷却器的传热量为

$$P = KA_0\theta_m \quad (m) \tag{1.6-30}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w}\frac{A_0}{A_w} + \frac{\delta}{\lambda}\frac{A_0}{A_w} + \frac{1}{\alpha_0\eta_0}} \quad [W/(m^2 \cdot K)]$$

$$\theta_m = \frac{\theta_0 - \theta_w}{2.3\lg\left(1 + \frac{\theta_0 - \theta_w}{t_0 - t_w}\right)} \quad (K)$$

式中，K 为对气侧的传热系数；θ_m 为汽水对数平均温差；A_0、A_w 为气侧和水侧的散热表面积，m^2；α_0、α_w 为气侧和水侧的表面传热时的传热系数，$W/(m^2 \cdot K)$；δ 为管壁厚度，m；λ 为管壁热导率，$W/(m \cdot K)$；θ_0 为进出气体间温差，K；θ_w 为进出水间的温差，K；t_0 为出口气体温度，℃；t_w 为进水温度，℃；η_0 为筋化系数，当气侧管壁加筋后，它等于加筋后的实际传热量与假设整个筋表面处于筋基温度下的换热量之比。

冷却器的传热能力是由传热系数与冷却管的散热面共同决定的。如图1.6-30、图1.6-31所示为几种常见冷却器的传热系数及传热能力（$1m^3$ 见方体积内）与空气速度的关系曲线。

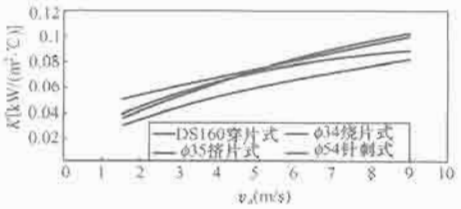


图1.6-30 几种冷却器传热系数与进风速度的关系

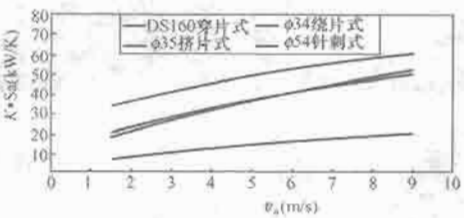


图1.6-31 几种冷却器传热能力（$1m^3$ 见方体积内）与进风速度的关系

几种常见冷却器的风阻特性曲线，如图1.6-32所示。

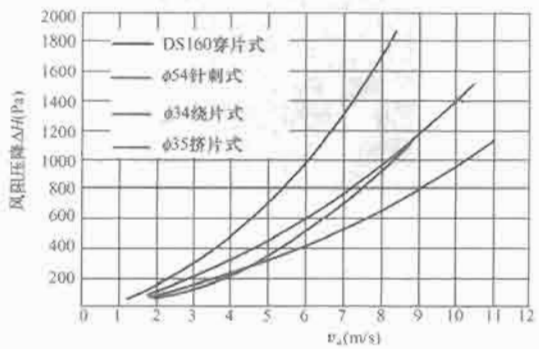


图1.6-32 几种冷却器风阻特性曲线

当出入口气体温差一定时，冷却器的传热量与冷却水的进水温度有关。如以进水温度为30℃时的传热量为基准，则进水温度每降低1K，传热量提高10%；反之，每升高1K，则降低10%。

当被冷却气体为氢时，式（1.6-9）右边应再乘以系数 K_H

$$K_H = 1.3p_H^{0.6} \tag{1.6-31}$$

而由图1.6-15查得的风阻压降应乘以系数 K_{FH}

$$K_{FH} = 0.1p_H \tag{1.6-32}$$

式中，p_H 为氢的绝对压力与标准大气压之比。

冷却器冷却水量变化对出水温升的影响如图1.6-33所示。

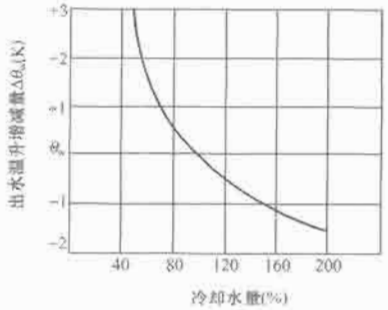


图1.6-33 冷却水量变化对出水温升的影响

8.3 气体-气体冷却器

这种冷却器的作用是使一部分气体将热量传递给另一部分气体，实现两部分气体间热量的交换。它通常用于封闭循环的大中型交流电机，特别是用于防尘、防爆、密封要求严格的大中型交流电机。其结构比气体-水冷却器的简单。

这种冷却通常是由一些冷却铜管按一定规则排列成管族，形成一定的气体流通路径。典型的外形结构如图1.6-34所示。其传热系数如图1.6-35所示。

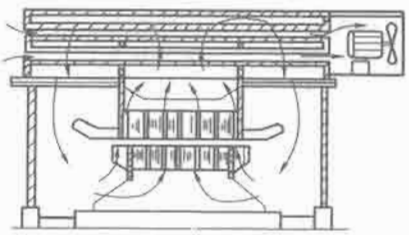


图1.6-34 气体-气体冷却器布置示意图

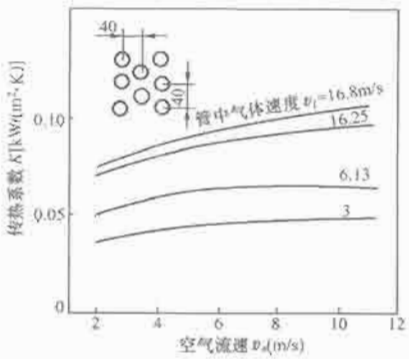


图1.6-35 气体-气体冷却器传热系数

8.4 冷却器的选用

电机用冷却器一般都设计和制成标准的结构型式，选用

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

时应注意以下几点：

1）按照电机的损耗和规定的冷却器参数校核冷却器的负荷能力和工作裕度。当不能满足要求时，应重新选择冷却管或重新排列冷却管，使其体积小，成本低，具有足够的冷却能力和裕度。

2）根据不同冷却介质和使用条件，合理选用冷却器的运行参数，如采用氢气冷却时，冷却器的运行参数可取得偏高一些。

3）用于冷却器的冷却水，有时可能会含有不同程度的泥沙，为避免因含泥沙使传热系数减少，适当提高水速是有利的，但应权衡因水速提高，泥沙对冷却器管壁磨损的影响。

4）气体-气体冷却器的传热能力较低，为了增加传热面积而又不增大流阻，可选用椭圆形冷却管。

5）选用耐水腐蚀性能好的冷却管，以提高冷却管的运行可靠性和寿命。

6）冷却器的传热性能与生产工艺关系非常大，选用时注意生产厂家的制造工艺水平。

9　相似方法在电机通风系统研究中的应用

研究电机通风系统必须变更各种结构和转速，这在真机上难以实现。采用模型研究通风系统是一种有效的方法，但真机与模型必须相似。

9.1　电机通风模型

9.1.1　通风模型设计的理论基础

从 17 世纪到 19 世纪在理论和实践两方面为相似理论的建立作了许多开创性的工作。在我国很多著作中都阐述的 M. B. 基尔比契夫“相似三原理”，是前苏联热工学者 1933 年在《相似原理》一书中提出的，在以后的时间里得到了推广和完善，并广泛应用许多行业。其中相似法则与量纲分析是进行模型设计和试验的理论依据和手段。利用量纲分析的方法可决定相似准则并正确处理实验数据。量纲分析的基本原理是：凡是正确反映客观规律的物理方程，其各项的量纲都必须是一致的，这称为量纲的和谐原理。而无量纲数可以是两个相同量的比值，也可以通过几个有量纲数通过乘、除组合而成，如雷诺数等。无量纲数不会因过程大小的不同而改变。也就是说，对于同样的流动状态，无量纲数应为常数。电机通风模型的目的是用模型里产生的物理现象近似地揭示实际电机中的物理规律。这要求模型中能产生与实际电机中相似的物理现象。针对这一要求在设计和进行实验时必须分析模型模拟的范围和程度。在工程实际中要做到理论上的完全相似，往往是很困难的，而且也没有必要做到完全相似。因此，通常在模型设计时采用相似理论的放宽原则。

9.1.2　电机通风的物理现象

由于只限于讨论电机稳定运行情况下的通风现象，因此一切物理参数全是恒定的，不随时间改变的，为定常过程。

电机通风的目的在于冷却电机各部件，在流动过程中伴随着能量的交换，因此，电机中空气所参与的过程分为两方面，空气动力和热交换现象。

电机转子的运动造成空气压力的升高，压力差是空气运动的最根本原因，因此，电机通风是有压轻流体运动。

电机中气流速度一般不超出 50m/s，它所能产生的动压力不超过 1500Pa，相对大气压力只占 1.6%，因此电机内部压力变化引起的空气密度改变不超过 1.6%，可以认为是不可压缩流体的流动。

空气参与热交换，固体表面向空气放热，因此，空气在电机中有一定的温度差别，这样才能维持热量的传递，所以气流是不等温的。

电机中气流的分布、涡流的产生消失、气动阻力，以及能量损失都与空气的黏性分不开，因此，黏性是电机通风问题不可忽视的因素。

综合以上说明：电机通风系统中的流动现象属于黏性不可压缩轻流体作不等温定常流动。

实际上，电机中温度分布对 ρ 和 μ 的影响并不大，电机一般空气进出口温差约是 18～30K，电机冷空气温度约为 40℃，可见空气在电机内部的温度变化最大不过是 40～70℃。在这个范围内空气密度 ρ 变化 8.7%，黏度变化约为 13%。由于黏性流体的运动有稳定性和自模性——速度和压力分布在黏性、密度变化相当范围内是不改变的，这样电机中空气温度的变化不会使气流速度和压力产生显著变化。这样在研究通风时就可以略去温度影响，简化为黏性不可压轻流体的等温定常流动。

9.1.3　电机通风系统的相似分析

由描写电机通风现象的方程组或基本定律出发，根据相似原理可以推导出两个现象相似的必要充分条件。

如果确定物理现象的完整物理参数，在两系统中对应的空间和时间段上都成线性关系，则把两系统中的两现象叫做物理相似现象。空间相似指几何位置对应成比例。时间相似指对现象所选时间起点有对应的时刻，这对现象参数恒定不变的定常现象则没有限制。

电机通风现象是指空气受力运动，所以描写力和运动的物理参数要对应成比例（即相似）。

对应的空间应有相似的速度（加速度）——方向一致，大小成比例，或叫速度（加速度）场相似，这是运动相似，即

$$\frac{v'}{v}=C'_v \text{——速度}$$

式中，v' 为模型速度；v 为真机速度。

对应的空间作用着同样性质的力，主要是压力、黏滞力，并且相应成比例，方向一致。这就是动力相似，即

$$\frac{p'}{p}=C'_p \text{——压力}\qquad \frac{\tau'}{\tau}=C'_\tau\left(\tau=\mu\frac{\partial v}{\partial n}\right) \text{——黏滞应力}$$

式中，p' 为模型压力；p 为真机压力；τ' 为模型黏滞应力；τ 为真机黏滞应力。

现象的综合结果是在一定物理条件下产生的，参与介质的物理参数相似，即物性相似。

主要是

$$\frac{\rho'}{\rho}=C'_\rho \text{——密度}$$

$$\frac{\mu'}{\mu}=C'_\mu \text{——黏度}$$

式中，ρ' 为模型密度；ρ 为真机密度；μ' 为模型黏度；μ 为真机黏度。

要达到以上诸相似，在两系统中相似系数 C' 是不能任意选的。由描写现象的基本物理定律所制约的各量之间的关系，根据相似分析原理可以导出两个现象相似的条件，并且有鲜明的物理意义。

在两流体系统中，由牛顿力学定律 $F=ma$，压差力产生加速度，可推导出 $\frac{p'}{\rho' v'^2}=\frac{p}{\rho v^2}=$常数，即欧拉准数，即

$$Eu=\frac{p}{\rho v^2} \qquad (1.6\text{-}33)$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

两系统中有相等的 Eu 的意义就是压力与惯性力的比值在两系统中对应相等。或是说两系统中压力与速度分布相似则两系统中压力与惯性力成比例。

此外，系统中还有黏性产生的摩擦力存在。按牛顿力学定律可得出 $\frac{L'v'\rho'}{\mu'}=\frac{Lv\rho}{\mu}=Re=$ 常数，即雷诺准数，即

$$Re=\frac{Lv}{\gamma} \tag{1.6-34}$$

两系统相似要 Re 准数相等的物理意义是两系统中对应有惯性力与摩擦力成比例。Re 数的意义是系统中一点的惯性力与摩擦力的比值。这里认为两系统中密度全都不变，所以各处速度在封闭面上的通量为零就满足质量守恒。既然速度分布相似，则两系统必定自动相应满足质量守恒，因此不必另加条件。

Re、Eu 两准数对应相等是两系统运动相似和动力相似的必要条件。其物理意义是两系统中处处作用相同性质的力，摩擦力、压力和速度分布成比例。

由于 Eu 准数只是 Re 准数的函数 $Eu=f(Re)$，所以只要 Re 准数相等就可以了，这时 Eu 准数自动相等。

因为是定常现象，单值条件中时间条件不需要。

物理条件：因为认为是等温流动，$\theta=$常数，其他 $\rho=$常数，$\mu=$常数都自动满足了。因为压力变化小于 1.6%，任何均质流体全能保持 $\rho=$常数，$\mu=$常数。冷模型自动保持 $\theta\approx$常数。

几何条件：几何相似，要求两系统尺寸成比例形状一样，表面相对粗糙度相等，这些是影响气动特性的主要几何因素。

边界相似：介质全有黏性，黏性固壁条件 $v=\omega$ 自动满足，v 为流体速度，ω 为固体表面速度，这里只要求固体表面有对应的速度就可以了，由于电机中只有转子上的构件运动，几何尺寸又成比例，所以这一条件也自动满足。

这样对一个冷模型相似的条件只有两个，一个是几何相似；另一个是 Re 准数相等。

9.1.4 电机通风系统的模化

由以上相似分析说明在近似地认为电机通风属于黏性不可压轻流体的定常等温流动时，只要保持模型的 Re 准数与实体相等，模型在几何上与实体完全相似就可以了。这样模型中压力分布和气流速度分布与实际电机对应相似。电机通风系统极为复杂，它包括旋转的压力元件和各种形状的风阻元件，但它有以下几个方面的流动特性：

1）风路全是由短的风道组成，截面多变化，因此局部阻力为主，沿程阻力很小只占 10%左右。

2）全部压头由转子产生，压头正比于转子周速二次方。

3）电机中转动部件中的气流产生很大的搅动作用，在风道中造成很高紊流度，惠州发电电动机的雷诺数约为 3.6×10^7，处于充分紊流状态。

4）由于封闭循环系统中空气周而复始，没有外来气流影响，边界条件可以自动建立。

以上特点使模型模拟真机得到简化。

9.1.5 真机与模型参数之间的关系

当模型转速大于某一转速时，流体流动的雷诺数都远大于 10^6，模型试验可以进入自模区。若模型在自模区内运行，在不同转速情况下各参数应用量纲分析的方法找出各物理量之间的联系，可推导出通风系统的基本参数应符合下列规律：

风速 $v_H/v_M=(L_H/L_M)(n_H/n_M)$ (1.6-35)

压头 $H_H/H_M=(L_H/L_M)^2(n_H/n_M)^2$ (1.6-36)

流量 $Q_H/Q_M=(L_H/L_M)^3(n_H/n_M)$ (1.6-37)

通风损耗 $P_H/P_M=(L_H/L_M)^5(n_H/n_M)^3$ (1.6-38)

图 1.6-36 为龙滩电站的通风模型照片。



图 1.6-36 龙滩电站的通风模型照片

9.2 水模型

用水作为介质来研究电机的通风系统而设计制作的模型，叫水模型。它有如下特点：

1）水的黏度为空气的 1/16，因此，对同样的 Re 数，水模型的尺寸和转速可比通风模型的小得多。

2）由于尺寸小，转速低，水模型的流量、流速将很小，但由于水的密度很大（约为空气的 900 倍），故压力很高，若用测得的压力来换算流量、流速，将提高测量的精度。

3）便于进行流谱摄影，研究元件流动特征。

4）制造技术（精度）要求较高，不能渗水漏水。

表 1.6-17 列出了水轮发电机两种模型设计参数。

表 1.6-17 水轮发电机两种模型设计参数

项 目	真 机	空气模型 $C_l=5$	水模型 $C_l=5$	
工作流体温度（℃）	54	50	40	20
转子外径（m）	5	1.0	1.0	1.0
转速（r/min）	277	6925	231	346
运动粘度（m^2/s）	1.8×10^{-7}	1.8×10^{-7}	0.60×10^{-6}	1×10^{-6}
重度（N/m^3）	1	1.1	992	998
压头（kPa）	1	25	23.2	52
转子圆周速度（m/s）	72.5	3625	12.1	18.1
流量（m^3/s）	100	16	0.666	1.0
流体损耗（kW）	500	2500	78	260
电机功率（kW）	625	3100	100	330
雷诺数（%）	100	100	100	100

10 电机发热与冷却的测量

电机的通风冷却系统是一个十分复杂的气体动力和传热系统，往往不是只用典型基础的实验结果能完整地描述的。必须通过模型和真机实测才能分析证实机组通风设计的正确性和合理性，并可发现存在的问题，为改进通风系统提供可靠的数据。

10.1 电机发热与冷却测试内容

电机的发热与冷却测试内容主要包括：

1）通风系统总风量测量。

2）上、下风道风量分配测量。

3）定子风沟风速分布测量。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4）通风损耗测量。

10.2　测试原理

1）用“中速风表”测量冷却器的平均出风速度，此风速值与冷却器面积及个数相等，即得总风量，即

$$Q=vsn$$

2）用“中速风表”测量下风道的平均风速，用卷尺测量下风道面积，平均风速与下风道面积相乘即得下风道风量，总风量减去下风道风量即得上风道风量。

3）用“热敏球式电风速计”在拆除冷却器的位置逐个进行定子风沟风速测量，定子风沟风速与定子风沟面积相乘即得定子风沟风量分配。

4）在发电机空转的情况下，用电阻网测量发电机各冷却器前后的温差，与冷却器及气体容积比热相乘即得冷却器带走的损耗，各冷却器所带走的损耗之和即为发电机的通风损耗。

10.3　测试所用的试验仪器

DFA—Ⅱ型中速风表	1 块
QDF—3 热敏球式电风速计	1 台
单臂电桥	1 台
停表	1 块
卷尺	1 个
电阻网	1 个

10.4　测试要求的试验工况

1）发电机空转至额定转速，进行总风量测量，上、下风道风量分配测量。

2）拆掉一个冷却器，发电机空转至额定转速，进行定子风沟风速分布测量。

3）发电机空转约 8h 达到热稳定，进行发电机通风损耗测量。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 7 章 电机振动、噪声与电磁兼容

1 电机振动

1.1 产生电机振动的主要因素

旋转电机的振动不仅可能影响电机自身运行的安全，而且还会影响周边的结构噪声和环境振动。产生电机振动的主要因素有：

1）电机转子的静和（或）动不平衡。

2）磁场产生的径向力和（或）轴向分力，特别是 2 倍电网频率的振动。

3）与临界转速有关，由于转子集中质量导致转子弯曲而产生的振动。

4）轴承引起的振动。

5）换向器、电刷装置产生的振动。

6）调频器的谐波，特别是 1/2 主频导致的振动。

7）单相电机、同步电机旋转磁场切向力有时产生的扭振。

1.2 电机振动限值

为了保证电机安全运行，控制电机对环境振动和结构噪声的影响，确保电机产品质量，我国以强制标准的形式颁布了 GB 10068《轴中心高为 56mm 及以上电机的机械振动振动的测量、评定及限值》，所属范围的电机必须按此国标考核，但应注意不同年代版本的限值是不一样的。

1.2.1 现行国家标准 GB 10068—2000 的限值

其规定范围如下：

1）轴中心高为 56mm 及以上，50MW 以下的单台空载运行的电机。

2）转速范围限于 600～3600r/min。

3）不包括三相换向器电动机、单相电机、单相供电的三相电机、立式水轮发电机、永磁发电机或串励直流电机。

这个范围电机的最大振动烈度值（振动速度有效值）都不能超过表 1.7-1 中 N 等级的规定。

另外，对于功率大于 1000kW，采用滑动轴承的二、四极电机，除应符合表 1.7-1 的规定外，其轴相对振动还应符合表 1.7-2 的规定。

1.2.2 IEC 60034-14：2003 版本的限值

GB 10068—2000 是等同采用 IEC 60034-14 第 2 版（1996 年），目前已进入修订程序，新标准将等同采用 IEC 60034-14 第 3 版（2003 年）。考虑到本大典应有较长的时效性，特将 IEC 60034-14：2003 版本的限值列入表 1.7-3 和表 1.7-4。这些限值实际上就是 GB 10068 新版本的限值。必须注意：

1）新标准的转速范围扩大为 120～15000r/min。

表 1.7-1　GB 10068—2000 规定的不同轴中心高 H 对应的振动烈度限值（振动速度有效值）　　单位：mm/s

振动等级	额定转速 (r/min)	电机在自由悬置状态下测量				刚性安装
		56mm<H≤132mm	132mm<H≤225mm	225mm<H≤400mm	H>400mm	H>400mm
N	600～3600	1.8	2.8	3.5	3.5	2.8
R	600～1800	0.71	1.12	1.8	2.8	1.8
	>1800～3600	1.12	1.8	2.8	2.8	1.8
S	600～1800	0.45	0.71	1.12	—	—
	>1800～3600	0.71	1.12	1.8	—	—

注　1. 如未规定级别，电机应符合 N 级要求。

2. R 级电机多用于机床驱动中，S 级电机用于对振动要求严格的特殊机械驱动，S 级仅适用于轴中心高 H≤400mm 的电机。

3. 对要求比表 1 中数值更小的电机，推荐从数系 0.45、0.71、1.12、1.8 和 2.8mm/s 等中选取限值。

4. 对于轴中心高大于 400mm 的电机，两种安装方法均适用，除非另有协议，可由制造厂选择安装方式。

5. 制造厂和用户应考虑到检测仪器可能有±10%的测量容差。

6. 一台电机，自身的平衡较好，符合表中的级别，但当安装在现场中受各种因素，如地基不平、被驱动机械的反作用等的影响，也会显示很大的振动。另外，由于所驱动的诸单元的固有频率与电机旋转体少量残余不平衡激励频率极为接近也会引起振动，在这种情形下，不仅只是对电机，而且对装置里的每一单元都要检验。

7. 以相同机座带底脚卧式电机的轴中心高作为无底脚电机、上脚式电机或立式电机的轴中心高。

表 1.7-2　GB 10068—2000 规定的最大轴相对振动（S_{p-p}）和最大径向跳动的限值

振动等级	极　数	轴相对位移（μm）	最大径向跳动（μm）
N	2	70	18
	4	90	23
R	2	50	12.5
	4	70	18

注　1. R 等级通常是对驱动关键设备的高速电机规定的。

2. 所有限值适用于 50Hz 和 60Hz 两种频率的电机。

3. 最大轴相对位移包括径向跳动。

表 1.7-3　IEC 60034—14：2003 规定的按轴高的振动速度、位移和振动加速度（有效值）的最大振动幅度限值

振动等级	轴高 (mm)	56≤H≤132			132<H≤280			H>280		
	安装	位移 (μm)	速度 (mm/s)	加速度 (m/s^2)	位移 (μm)	速度 (mm/s)	加速度 (m/s^2)	位移 (μm)	速度 (mm/s)	加速度 (m/s^2)
A	弹性	25	1.6	2.5	35	2.2	3.5	45	2.8	4.4
	刚性	21	1.3	2.0	29	1.8	2.8	37	2.3	3.6
B	弹性	11	0.7	1.1	18	1.1	1.7	29	1.8	2.8
	刚性	—	—	—	14	0.9	1.4	24	1.5	2.4

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2）检测考核的物理量从振动烈度增加了振动位移和振动加速度共三个振动量的限值，见表 1.7-3。而对于转速在 600～3600r/min 的电机，在出厂试验时，允许只测量振动速度。

3）对于有滑动轴承，额定功率大于 1000kW、额定速度大于 1200r/min 的电机，轴相对振动的限值见表 1.7-4。

表 1.7-4　IEC 60034-14：2003 规定的最大轴相对振动（S_{P-P}）和最大径向跳动的限值

振动等级	转速范围	最大轴相对位移(μm)	最大径向跳动(μm)
A	>1800	65	16
	≤1800	90	23
B	>1800	50	12.5
	≤1800	65	16

注　1. 等级“A”适用于对振动无特殊要求的电机。
2. 等级“B”适用于对振动有特殊要求的电机。对轴中心高 132mm 及以下电机不考虑刚性安装。

1.3　电机振动测定方法

旋转电机振动的测定应按 GB 10068 标准进行检测。

1.3.1　振动烈度的测定

振动烈度检测时应注意如下几点：

1）转子键槽内应装配与平衡时一致的半键（通常是标准键高一半的半键）。

2）电机试验时的安装方式应与考核限值要求对应，一般轴中心高 $H\leqslant 400$ 的电机和立式电机都采用自由悬置（弹性悬挂或弹性支撑），其弹性悬挂的拉伸量 x 或弹性支撑的压缩量 x 必须大于图 1.7-1 根据转速确定的位移值。

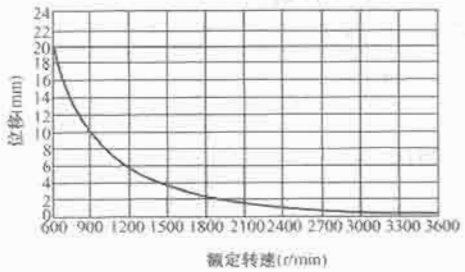


图 1.7-1　自由悬置安装时弹性位移值与电机转速的关系

3）测点为六点，配置在两轴承支撑上三个相互垂直的位置，其传感器的中轴线应尽量穿过轴承的支撑点。

4）测试量全部采用有效值。当出现起伏性、脉动性或周期性拍频振动时，所读取的最大最小两读数则按下式处理

$$x_{r.m.s}=\sqrt{\frac{x_{max}^2+x_{min}^2}{2}}$$

1.3.2　轴相对振动的测定

轴相对振动位移测量必须用两个非接触式传感器互成 90°安装，直接测量轴的径向相对位移。

2　电机噪声

2.1　电机的主要噪声源及其产生机理

电机的主要噪声源有通风噪声、电磁噪声和机械噪声。各类噪声源的产生机理论述如下。

2.1.1　通风噪声

风扇或其他通风元件以及转子旋转形成的空气涡流噪声，风扇旋转使冷却空气周期性脉动或气体撞击障碍物而产生的单频噪声，风路中薄壁零件谐振或风路设计不合理产生的“笛声”。

2.1.2　电磁噪声

电机气隙中定、转子磁场相互作用产生随时间和空间变化的径向力，使定子铁心和机座随时间周期性变形而引起振动，使周围空气脉动产生噪声。

（1）径向电磁力波

设 $b(\theta,t)$ 为气隙中距坐标轴线圆周角 θ 的某一点在时间 t 的气隙磁通密度瞬时值，μ_0 为空气磁导率，则在该点作用于定子铁心单位表面积上的径向力瞬时值为

$$f_r(\theta,t)=\frac{b^2(\theta,t)}{2\mu_0}$$

由于 $b(\theta,t)$ 表示为一系列正弦分布的旋转磁场，故径向力也可表示为各种不同阶次 m 和角频率 ω 的旋转力波的合成，即

$$f_r(\theta,t)=\sum_i F_{ri}\cos(m_i\theta-\omega_i t)$$

径向力波的阶次 m 确定了电机定子径向振动的振型，$m=0$ 时，径向力与空间坐标无关，但随时间周期性变化；$m=1$ 时，相当于受周期性变化的单边磁拉力作用；$m=2$ 时，正弦分布力波导致定子产生椭圆形的周期性变形；$m>2$ 时，导致产生多边形的周期性变形。图 1.7-2 为定子径向力波分布示意图。

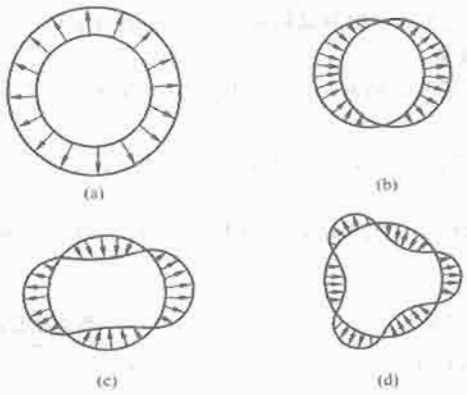


图 1.7-2　定子径向力波分布示意图
（a）$m=0$；（b）$m=1$；（c）$m=2$；（d）$m=3$

径向力波的阶次越低，铁心产生弯曲变形的相邻两支点间距离越长，径向变形也越大。定子铁心变形量约与力波阶次 m 的四次方成反比，与力波幅值成正比，故幅值较大的低阶次径向力波是引起电磁噪声的主要根源。此外，应特别注意的是，当径向力波频率与定子铁心和机座的固有振动频率接近甚至相同时，会发生谐振，这时铁心振动及辐射噪声将大大增加。

（2）基波磁场产生的电磁噪声

气隙磁通密度幅值为 B_{δ} 的 p 对极基波磁场产生的径向力波阶次 $m=2p$，频率为 $2f_1$（f_1 为产生磁场的电流频率，对电动机即电源频率），力波幅值与 B_{δ}^2 成正比。即基波磁场可产生 2 倍于电流频率的振动噪声。对四极以上的电机，基波磁场产生的力波阶次 $m>4$，铁心变形量将是微小的，故倍频噪声常见于两极电机。

（3）谐波磁场产生的电磁噪声

电机气隙磁场中含有一系列定子磁场谐波和一系列转子磁场谐波。由某次定子谐波磁场与另一次转子谐波磁场相互作用可能产生较低阶次的力波，从而产生较大的电磁噪声。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

设转子 μ_a 次谐波磁场是由定子 υ_b 次谐波磁场感应产生的，则 υ_b 次磁场与 μ_a 次磁场作用产生的一对径向力波阶次为

$$|\upsilon_b-\mu_a| \quad 和 \quad |\upsilon_b+\mu_a|$$

它们引起的定子振动及产生的噪声频率分别为

$$\frac{|\mu_a-\upsilon_b|}{p}(1-s)f_1 \quad 和 \quad \left[2+\frac{|\mu_a-\upsilon_b|}{p}(1-s)\right]f_1$$

式中，s 为运行转差率。

对槽数为 Q_z 的笼型感应电机，其产生的噪声频率可分别由下式计算

$$K_2\frac{Q_z}{p}(1-s)f_1 \quad 和 \quad \left[2+K_2\frac{Q_z}{p}(1-s)\right]f_1$$

式中，$K_2=\pm1, \pm2, \cdots$。

由定子和转子谐波磁场相互作用产生的力波阶次 $m=\upsilon_b\pm\mu_a$ 为较小整数时，将会产生较强的电磁噪声。

2.1.3 机械噪声

由转子机械不平衡引起的离心力所产生的机械振动和噪声，轴承振动噪声，电刷与集电环或换向器滑动接触噪声，受轴承振动激发的端盖轴向振动噪声。

2.2 电机噪声测定方法及噪声源识别

2.2.1 电机噪声测定方法

电机噪声测定方法按 GB/T 10069.1《旋转电机噪声测定方法》国家标准进行，该标准综合了所有现行机器声功率测试方法标准的内容，其特点是：

1）包含了三种测试精度等级的测试方法标准，这三种精度等级是：

1 级精度，精密法，A 计权声功率级测试的不确定度为 1～1.5dB。

2 级精度，工程法，A 计权声功率级测试的不确定度为 2dB。

3 级精度，简易法，A 计权声功率级测试不确定度为 4～5dB。

2）包含了三种声学测试技术标准，即声压级法、声强法和振速法。

3）适合于各种测试环境，例如：

在试验室内测试，即有消声室、半消声室和混响室。

也可在普通环境测试，如大试验车间和大房间等，一般称其为一个反射面上的近似自由场。

还可在现场测试，即产品实际运行的场合，特别对于大型设备，无法进入上述要求的环境时。

即使是声压级测试还分自由场法和混响场法，其测试环境、测点配置、测量结果的数据计算都不一样。

所以在按 GB/T 10069.1 标准对电机进行噪声测定时，一定要根据各自现场条件、仪器情况、测量精度的要求等方面来确定采用什么标准测试。这里可参考表 1.7-5。

（1）声压法自由场测试步骤要点

声压法测试分两大类型：一类是自由场类型；另一种则是混响场类型，常见的是自由场类型，所以先看自由场类型（包括一个反射面上的类自由场）的测试方法。

1）根据电机轴中心高确定测试面和安装方式，归纳为表 1.7-6。

与旧标准比较取消了半椭球面。电机长则以 1m 为判据。

2）在测试面上测量各点声压级 L_{pi}，如果相邻两点声压级差大于 5dB 或直线距离大于 1m 都应增加测点。计算平均声压级

$$\overline{L}'_p=10\lg\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}10^{0.1L_{pi}}\right) \qquad (1.7\text{-}1)$$

3）背景声级修正，一般消声室内测试没有此项，对于环境噪声较大的类自由场都应进行此项修正。此时应先测量背景噪声级 L_{pb}，修正后平均声压级为

$$\overline{L}_p=10\lg(10^{0.1\overline{L}'_p}-10^{0.1L_{pb}}) \qquad (1.7\text{-}2)$$

表 1.7-5　　声功率级测定标准方法及其相关应用场合

国家标准	环　境	背景噪声级	精度等级	测 试 量
GB/T 6881.1	专用测试室“混响室”	很低的背景噪声	1 级	声压
GB/T 6881.2	强混响的普通房间	低背景噪声级	2 级	声压
GB/T 6881.3	专用测试室	低背景噪声级	2 级	声压
GB/T 3767	现场，但对环境反射有所限制	低背景噪声级	2 级	声压
GB/T 6882	专用测试室 消声室，半消声室	很低的背景噪声	1 级	声压
GB/T 3768	现场，对环境反射限制较小	对背景噪声级限制较小	3 级	声压
GB/T 16538	现场，近似混响条件	低背景噪声级	2 级	声压
GB/T 16404.1	现场，无应用限制	对稳定背景噪声无应用限制	1、2 和 3 级	法向声强
GB/T 16404.2	现场，无应用限制	对稳定背景噪声无应用限制	2 级和 3 级	法向声强
GB/T 16539	现场，无应用限制，机械振动辐射声	对背景噪声无应用限制	2 级和 3 级	振速

表 1.7-6　　测试面和安装方式的选择表

电机尺寸		试面类型	测试距离（m）	最少测点数	测试面面积 s 计算公式	安装方式
轴中心高 H（mm）	电机长 L（m）					
$H\leqslant90$	$L<1$	半球面	距中心 $r=0.4$m	4 点	$s=2\pi r^2$	弹性
$90<H\leqslant225$			距中心 $r=1$m	5 点		
	$L\geqslant1$	方矩形面（等效）	距外壳 $d=1$m		$s=4(ab+bc+ca)\times\frac{a+b+c}{a+b+c+2d}$	
$H>225$	无限制					$H>400$mm 刚性

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

背景声级过高是不允许修正的，标准中以声源平均声压级$\overline{L}'_p$与背景声平均声压级$\overline{L}_{pb}$的声级差 ΔL（$\Delta L=\overline{L}'_p-\overline{L}_{pb}$）来判定，一般标准要求 $\Delta L\geqslant 6$dB；有些标准工程级（如 GB/T 6881）允许 $\Delta L\geqslant 4$dB；对于简易法（3 级）则允许 $\Delta L\geqslant 3$dB。

4）反射声的修正，一般消声室内测试没有此项，对于类自由场或现场测试都应进行此项修正。求取反射声修正值 K_2 有四个方法：

①估算法，适合于 3 级精度（简易法）

$$K_{2A}=10\lg\left[1+4\left(\frac{s}{A}\right)\right] \qquad (1.7\text{-}3)$$

式中，$A=\sum s_i\alpha_i$，吸声系数 α_i 查表 1.7-7 确定。

②混响时间法，测定房间混响时间 T 和房间的容积 V，可得反射声修正值

$$K_2=10\lg\left[1+4\left(\frac{s}{A}\right)\right] \qquad (1.7\text{-}4)$$

$$A=0.16\left(\frac{V}{T}\right)$$

因为混响时间 T 与频率有关，所以 K_2 也是频率的函数。

表 1.7-7　　吸声系数 α_i 选用表

平均吸声系数	房　间　特　征
0.05	几乎空房间，平滑硬墙
0.1	部分空，平滑硬墙
0.15	带家具的矩形房间
0.2	带家具的不规则的房间或厂房
0.25	带有装饰家具的房间或厂房，天花板、墙面有局部吸声材料
0.35	天花板和墙面都装有吸声材料
0.5	房间天花板和墙面都装有大量吸声材料

注　参照 GB/T 3767 和 GB/T 3768，以下方法主要参照 GB/T 3767。

③双表面法，在标准测试面上测量的平均声压级 $\overline{L}_{p1}$，选择第二个测试面 s_2 测得的平均声压级为 $\overline{L}_{p2}$；要求 $s_2/s\geqslant 2$，最好为 4，可得

$$M=10^{0.1(\overline{L}_{p1}-\overline{L}_{p2})} \qquad A/S=\frac{4(M-1)}{1-\frac{Ms}{s_2}} \qquad (1.7\text{-}5)$$

再代入式（1.7-4）求 K_2。

④用标准声源的绝对比较法，在现场实测的标准声源声功率级为 L_{Wr}。

标定的标准声源声功率级为 L_{Wr0}，则反射声修正值为

$$K_2=L_{Wr}-L_{Wr0} \qquad (1.7\text{-}6)$$

5）计算声功率级

$$L_W=\overline{L}_p-K_2+10\lg S \quad (\text{dB}) \qquad (1.7\text{-}7)$$

（2）声压法混响场的测试方法

虽然在混响场内测试是一种声功率级的直接测量方法，但由于它仍是用测量声压的声级计进行测试所以它仍属于声压法。混响场内测试主要取决于混响室的容积、混响时间、声源位置数、测点数以及声源尺寸和性质，详细规定见 GB/T6881（或 ISO 3741）标准。首先应根据所建实验室和声源情况来确定采用的标准，再按标准测试，见表 1.7-8。

（3）声强法测试步骤要点

声强测量应按国标 GB/T 9614.1～GB/T 6914.3 进行，基本步骤如下：

1）选择测量面，对于电机应按表 1.7-6 原则选择。

2）确定测试距离和初始测点数，一般测试距离应大于 0.5m，测点数至少为 10 点，均匀分布，并要求测试面上每个 m^2 至少有一个测点。

表 1.7-8　　混响场测试法标准选用表

类　别	选　择　参　量		
实验室名称	混响室	硬壁房间	专用混响测试室
房间容积 V	最低中心频 100Hz 时 $V=200\sim300m^3$ 125Hz 时 $V=150\sim300m^3$ 200Hz 时 $V=70\sim300m^3$	$V=40\sim100m^3$	$V\geqslant 70m^3$ 混响参量应符合：$R=1+257/(fV^{1/3})$
声源体积 V_Q	$V_Q\leqslant 2\%$房间容积 V	$V_Q\leqslant 2.5\%$房间容积 V	
声源特性	稳态，宽带、窄带、离散频谱	任意，但无孤立的猝发声	
背景噪声限制	$\Delta L\geqslant 10$dB	$\Delta L\geqslant 6$dB	$\Delta L\geqslant 4$dB
测点位置数 N_M	$N_M\geqslant 6$ 或连续	$N_M\geqslant 3$ 或连续	$N_M\geqslant 3$ 或连续
测得声功率级	倍频程或 1/3 倍频程 A 计权	倍频程	倍频程或 A 计权
精度等级	1 级	2 级	2 级
标准编号	GB/T 6881.1	GB/T 6881.2	GB/T 6881.3

3）测量声场时间变化指示值 F_1，要求 $F_1\leqslant 0.6$，如果不满足要求，则应了解是声源问题还是环境噪声问题，并设法解决，如增加测量时间。

4）在每个测点上，按确定的测量时间测量声强 I_{ni}、声强级 $L_{I_{ni}}$ 和声压级 L_{pi}。

5）计算 F_2、F_3 和 L_d，要求 $F_2>Ld$ 或 $F_3-F_2>3$dB。如果不满足，则应降低背景噪声或缩短测试距离。

6）如果不满足 $F_2>Ld$ 等上述第 5 条的要求，且 $1\text{dB}\leqslant F_3-F_2\leqslant 3\text{dB}$，则应增加测点；测点数 N 还应符合判据 $N>CF_t^2$，测点增加直到满足所有判据为止。

7）计算声功率级

$$L_W=\overline{L}_I+10\lg\frac{S}{S_0} \quad (\text{dB}) \qquad (1.7\text{-}8)$$

（4）振速法测试负载噪声的步骤要点

电机负载噪声的测试可以用声强法、低噪声负载法、长轴外拖法、振速法等方法，其中振速法操作简便、最少受测试条件（反射声、环境噪声、拖动机械声、负载方式、安装条件等）的影响。

单台电机的空载噪声是可以在比较理想的条件下准确测定的。电机的负载噪声则不行，它必然附加很多因素。但可以在相同条件下测定电机空负载噪声的变化量，即电机负载噪声的增量 Δ。将其叠加在电机的空载噪声值之上，则为该台电机负载的噪声值。下面以振速法为例介绍电机负载噪声的测试方法。

1）按 GB/T 10069 的声压法测定电机的单台空载噪声，空载声功率级 L_{W0}。

2）用拆风扇或堵进风口的方法测量电机无扇时的声功率级 L'_{W0}，以计算该电机的风扇声功率级

$$L_F=10\lg(10^{0.1L_{W0}}-10^{0.1L_{W0}})$$

3）测量电机的长 L、宽 W、高 H，计算电机（基准体）的表面积 $S_1[S_1=2(WH+LH+WL)]$ 和声源尺寸 $D[D=(L+H+W)/3]$；对于基本系列电机 $S_1=8h(h+L)$，$D=$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$(4h+L)/3$（h 为轴中心高）。

4）安装电机负载，用振动噪声检测仪（注意按 D 的数值确定仪器上声源尺寸的位置）测量电机未加载的振动速度级 L_{V0i}，并计算未加载平均速度级

$$\overline{L}_{V0}=10\lg\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}10^{0.1L_{V0i}}\right) \tag{1.7-9}$$

5）测量电机加额定负载的振动速度级 L_{Vni}，并计算加载平均速度级

$$\overline{L}_{Vn}=10\lg\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}10^{0.1L_{Vni}}\right) \tag{1.7-10}$$

6）计算两种工况时的速度功率级：

未加载速度功率级

$$L_{V0W}=\overline{L}_{V0}+10\lg S_1 \tag{1.7-11}$$

加载后速度功率级

$$L_{VnW}=\overline{L}_{Vn}+10\lg S_1 \tag{1.7-12}$$

7）计算考虑风扇噪声后的两种工况整机声功率级：

未加载整机声功率级

$$L'_{W0}=10\lg(10^{0.1L_{V0W}}+10^{0.1L_{FW}}) \tag{1.7-13}$$

注：按此方法可测单台电机的空载噪声，一般情况风扇声功率级可认为不变，空载噪声实际上是机械噪声$\overline{L}_{V0}$的变化。

加载后整机声功率级

$$L'_{Wn}=10\lg(10^{0.1L_{VnW}}+10^{0.1L_{FW}}) \tag{1.7-14}$$

8）负载噪声增量计算

$$\Delta=L'_{Wn}-L'_{W0} \tag{1.7-15}$$

9）该电机的空载声功率级为 L_{W0}，负载声功率级为

$$L_{Wn}=L_{W0}+\Delta \tag{1.7-16}$$

2.2.2 常用电机噪声源的识别方法

（1）噪声源识别方法的类别

电机噪声源常用识别方法有：

1）测点位置法。根据各测点声级的大小与对应位置来判断噪声源。

2）变参数法。通过改变电机的某些参数，如电压、频率、空/负载、风扇通风系统参数等以确定噪声源。

3）分离元件法。针对性地将电机某些元件分离出来，如去掉风扇、滚动换成滑动轴承、更换转子等以识别噪声源。

4）声强法。利用声强测试的指向性原理识别噪声源。

5）频谱分析法。对电机噪声的1/3倍频程谱或窄带频谱进行分析以识别噪声源。

（2）用频谱进行分析识别电机噪声源的要点

图1.7-3是典型的电机1/3倍频程谱示例，可以根据图中各独立的直方块所对应的频率，再按表1.7-9来识别噪声源。

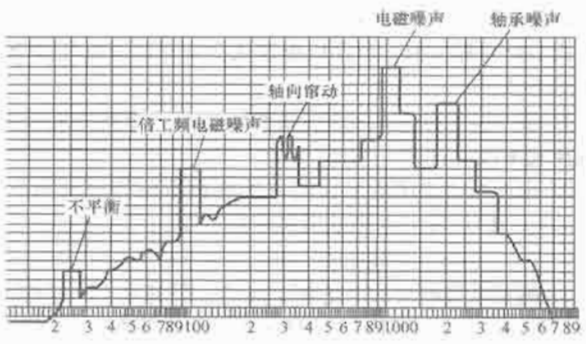


图1.7-3 典型的电机1/3倍频程谱示例

表1.7-9 频谱分析法识别电机噪声源的要点

类别	噪声名称	频率特征	原因分析
通风噪声	涡流声	50～1500Hz宽带声	与通风系统结构、风扇形式、风道参数等有关
	哨声、脉动声	频率单一 $f=km(n/60)$ k=1或2；m为风扇叶片数	1. 叶片数不当或与风道中的沟、槽、孔产生共鸣 2. 通风系统结构中的间隙太小引起的笛声
电磁噪声	单边磁拉力	$f=2f_0$有时同时出现f_0 f_0为供电频率	定、转子不同心，或定子刚度不够
	齿谐波噪声	$f=kz(n/60)$或$z(n/60)\pm2f_0$ k=1或2；z为定、转子槽数 f_0为供电频率	1. 定、转子槽配合不当 2. 转子斜槽度不当 3. 定子、端盖可能与谐波频率有共振 4. 加工或装配问题造成定、转子相对位置不正常
	转差拍频声	按转差率调制的$2f_0$拍频声	1. 转子有缺陷 2. 加工或装配问题造成定、转子相对位置不正常
	轴向窜动声	50～400Hz	1. 与轴承装配有关的工艺参数问题或加工偏差 2. 加工或装配问题造成定、转子相对位置不正常
	调频器谐波噪声	1/2供电频率和/或谐波频率	变频调速输出电源非正弦性
轴承噪声	轴承噪声	f=2000～5000Hz	1. 轴承品质问题 2. 与轴承装配有关的工艺参数问题或加工偏差 3. 轴承装配问题

2.3 电机噪声评定及噪声限值

2.3.1 电机噪声评定

噪声可通过听觉或用仪器测量其物理量来进行评定。

人的听觉范围很广，从勉强可听到的微音到刺耳疼痛的强音，其声压变化可达10^7，声强和声功率变化可达10^{14}，并且人的听觉对声信号强弱的反应不是线性的，而是呈对数比例关系。故工程上通常不用绝对单位，而常用相对于规定基准值之比的对数量——声压级、声强级、声功率级表示噪声的大小，单位为分贝（dB）。评定噪声的物理量见表1.7-10。

表1.7-10 评定噪声的物理量 单位：dB

名称	符号	定义
声压级	L_p	声压p与基准声压p_0之比的对数，即 $L_p=20\lg(p/p_0)$ 式中，$p_0=2\times10^{-5}N/m^2$
声强级	L_I	声强I与基准声强I_0之比的对数，即 $L_I=10\lg(I/I_0)$ 式中，$I_0=10^{-12}W/m^2$
声功率级	L_W	声功率W与基准声功率W_0之比的对数，即 $L_W=10\lg(W/W_0)$ 式中，$W_0=10^{-12}W$

声压级是现有一般噪声测量仪器能直接测出的物理量，但它与电机安装场所的声学特性和测点到电机距离等因素有密切关系，在表述噪声强弱时不方便。因而，常以A计权声功率级评定噪声，单位为dB（A），它不受上述因素的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

影响。

2.3.2　电机噪声限值

（1）现行国家标准 GB 10069.3—2006 的限值

本标准等同采用国际标准 IEC 60034-9 第 3 版（1997 年）。

旋转电机在本章 2.2.1 规定的条件下所测得的声功率级，不得超过下列有关规定的数值：

①除②规定以外的电机，空载运行必须按表 1.7-11 的规定；

②具有 IC01、IC11、IC21、IC411、IC511 或 IC611 冷却类型的，50Hz 或 60Hz，额定输出不低于 1kW 且不超过 400kW 的单速三相笼型异步电动机：

（a）空载运行时应按表 1.7-12 的规定。

（b）额定负载时必须按表 1.7-12 和表 1.7-13 规定值的总和值。

1）表 1.7-11 和表 1.7-12 的限值是由测试不确定度等级为 2 级精度和生产离散性而确定的。

2）通常满载时的声功率级比空载时的高，如果以空气动力噪声为主则变化较小，而以电磁声为主则变化就较显著。

3）本限值不考虑旋转方向，风扇为单向旋转的电机通常比双向的噪声低。这种影响对高速电机更为突出，对此可设计为仅单向运行。

4）对于直流电机，当其转速低于名义转速时，表 1.7-11 的限值可能不适用，此时噪声级与负载间的关系是重要的，其限值应该由生产厂与买方协商确定。

5）对于多速电机则适用于表 1.7-11 的数值。

表 1.7-11　　空载最大 A 计权声功率级，L_{wA}，dB（表 1.7-12 规定的电机除外）

（冷却方法 IC 的代码见 GB/T 1993）（防护分级 IP 的代码见 GB/T 4942.1）

额定转速 n_N (r/min)		$n_N \leqslant 960$			960$<n_N \leqslant$1320			1320$<n_N \leqslant$1900			1900$<n_N \leqslant$2360			2360$<n_N \leqslant$3150			3150$<n_N \leqslant$3750		
冷却方式（简单代码）		IC01 IC11 IC21 ①	IC411 IC511 IC611 ②	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7 ②	IC01 IC11 IC21 ①	IC411 IC511 IC611 ②	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7 ②	IC01 IC11 IC21 ①	IC411 IC511 IC611 ②	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7 ②	IC01 IC11 IC21 ①	IC411 IC511 IC611 ②	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7 ②	IC01 IC11 IC21 ①	IC411 IC511 IC611 ②	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7 ②	IC01 IC11 IC21 ①	IC411 IC511 IC611 ②	IC31 IC71W IC81W IC8A1W7 ②
额定输出 P_N (kW)	$1 \leqslant P_N \leqslant 1.1$	73	73	—	76	76	—	77	78	--	79	81	—	81	84	—	82	88	—
	$1.1 < P_N \leqslant 2.2$	74	74	—	78	78	—	81	82	—	83	85	—	85	88	—	86	91	—
	$2.2 < P_N \leqslant 5.5$	77	78	—	81	82	—	85	86	—	86	90	—	89	93	—	93	95	—
	$5.5 < P_N \leqslant 11$	81	82	—	85	85	—	88	90	—	90	93	—	93	97	—	97	98	—
	$11 < P_N \leqslant 22$	84	86	—	88	88	—	91	94	—	93	97	—	96	100	—	97	100	—
	$22 < P_N \leqslant 37$	87	90	—	91	91	—	94	98	—	96	100	—	99	102	—	101	102	—
	$37 < P_N \leqslant 55$	90	93	—	94	94	—	97	100	—	98	102	—	101	104	—	103	104	—
	$55 < P_N \leqslant 110$	93	96	—	97	98	—	100	103	--	101	104	—	103		106	—	105	106
	$110 < P_N \leqslant 220$	97	99	—	100	102	—	103	106	—	103	107	—	105	109	--	107	110	—
	$220 < P_N \leqslant 550$	99	102	98	103	105	100	106	108	102	106	109	102	107	111	102	110	113	105
	$550 < P_N \leqslant 1100$	101	105	100	106	108	103	108	111	104	108	111	104	109	112	104	111	116	106
	$1100 < P_N \leqslant 2200$	103	107	102	108	110	105	109	113	105	109	113	105	110	113	105	112	118	107
	$2200 < P_N \leqslant 5500$	105	109	104	110	112	106	110	115	106	111	115	107	112	115	107	114	120	109

① 典型的防护类型为 IP22 或 IP23。

② 典型的防护类型为 IP44 或 IP55。

表 1.7-12　　空载最大 A 计权声功率级 L_{wA}（IC01、IC11、IC21、IC411、IC511、IC611 单速三相笼型感应电动机）

单位：dB

额定输出 P_N (kW)	8 极		6 极		4 极		2 极	
	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
$1.0 < P_N \leqslant 2.2$	71	71	71	71	71	71	81	85
$2.2 < P_N \leqslant 5.5$	76	76	76	76	76	76	86	88
$5.5 < P_N \leqslant 11$	80	80	80	80	81	81	91	91
$11 < P_N \leqslant 22$	84	84	84	84	88	88	94	94
$22 < P_N \leqslant 37$	87	87	87	87	91	91	96	100
$37 < P_N \leqslant 55$	89	90	90	91	94	95	98	101
$55 < P_N \leqslant 110$	92	93	94	95	97	98	100	104
$110 < P_N \leqslant 220$	96	97	98	99	101	102	103	107
$220 < P_N \leqslant 400$	98	99	101	102	105	106	107	110

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.7-13 额定负载工况超过空载工况的 A 计权声功率级允许最大增加量 ΔL_{wA}

（电机的额定条件与表 1.7-12 一致） 单位：dB

额定输出 P_N (kW)	8极	6极	4极	2极
$1.0<P_N\leqslant11$	8	7	5	2
$11<P_N\leqslant37$	7	6	4	2
$37<P_N\leqslant110$	6	5	3	2
$110<P_N\leqslant400$	5	4	3	2

注 1. 此表给出的是在额定负载工况下对任何空载数值的预期最大增加量。

2. 此数值对 50Hz 和 60Hz 供电均适用。

（2）IEC 60034-9 第 4 版（2003 年）的限值

1）除 2）规定以外的电机，空载运行必须按表 1.7-11 的规定。

2）具有 IC01、IC11、IC21、IC411、IC511 或 IC611 冷却类型的，50Hz 或 60Hz，额定输出不低于 1kW 且不超过 1000kW 的单速三相笼型感应电动机：

①空载运行时应按表 1.7-14 的规定。

②额定负载时必须按表 1.7-14 和表 1.7-15 规定值的总和。

表 1.7-14 空载最大 A 计权声功率级 L_{wA}

（IC01、IC11、IC21、IC411、IC511、IC611 单速三相笼型感应电动机） 单位：dB

额定输出 P_N (kW)	8极		6极		4极		2极	
	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
$1.0<P_N\leqslant2.2$	70	71	70	71	70	71	78	85
$2.2<P_N\leqslant5.5$	73	76	73	76	73	76	83	88
$5.5<P_N\leqslant11$	77	80	77	80	78	81	88	91
$11<P_N\leqslant22$	81	84	81	84	85	88	91	94
$22<P_N\leqslant37$	84	87	84	87	88	91	93	100
$37<P_N\leqslant55$	86	90	87	91	91	95	95	101
$55<P_N\leqslant110$	89	93	91	95	95	98	97	104
$110<P_N\leqslant220$	94	97	96	99	99	102	100	107
$220<P_N\leqslant440$	96	98	98	101	102	105	103	109
$440<P_N\leqslant1000$	97	99	99	102	105	108	105	110
$1000<P_N$	按合同协议							

表 1.7-15 额定负载工况超过空载工况的 A 计权声功率级允许最大增加量，ΔL_{wA}

（电机的额定条件与表 1.7-14 一致） 单位：dB

额定输出 P_N (kW)	8极	6极	4极	2极
$1.0<P_N\leqslant11$	8	7	5	2
$11<P_N\leqslant37$	7	6	4	2
$37<P_N\leqslant110$	6	5	3	2
$110<P_N\leqslant400$	5	4	3	2
$400<P_N\leqslant2200$	4	3	2	2
$2200<P_N$	4	3	2	1

注 1. 此表给出的是在额定负载工况下对任何空载数值的预期最大增加量。

2. 此数值对 50Hz 和 60Hz 供电均适用。

2.4 降低电机噪声的措施

2.4.1 降低电磁噪声的措施

（1）适当降低气隙磁通密度

当气隙磁通密度由 $B_{\delta1}$ 降低到 $B_{\delta2}$ 时，相应的倍频噪声级的变化近似为

$$L_1-L_2=10\lg\left(\frac{B_{\delta1}}{B_{\delta2}}\right)^4$$

（2）适当增大气隙长度

定、转子间气隙长度 δ 增大，气隙磁导降低，可降低气隙谐波磁通密度，任意两个谐波磁场相互作用产生的径向力约与气隙长度二次方成反比。因此，气隙长度增大，噪声级可降低。当气隙长度由 δ_1 增大到 δ_2 时，相应的电磁噪声级变化为

$$L_1-L_2=10\lg\left(\frac{\delta_2}{\delta_1}\right)^4$$

（3）合理选择感应电机定、转子槽配合

在感应电机中，幅值较大的定、转子齿谐波磁场由定子槽数 Q_s、转子槽数 Q_r 决定，因而感应电机槽配合直接影响由定、转子谐波磁场相互作用所产生的径向力的大小、阶次和频率，对电磁噪声的大小和频率影响很大。

1）为避免定、转子一阶齿谐波作用产生低阶次力波及噪声，应注意避免

$$|Q_s-Q_r|=1,2,3,4$$

$$|Q_s-Q_r|=2p\pm1,2p\pm2,2p\pm3,2p\pm4$$

2）为避免定子相带谐波与转子一阶齿谐波作用产生低阶次力波及噪声，应注意避免

$$Q_r=|6kp\pm1|,|6kp\pm2|,|6kp\pm3|,|6kp\pm4|$$

$$Q_r=|6kp\pm2p\pm1|,|6kp\pm2p\pm2|,$$

$$|6kp\pm2p\pm3|,|6kp\pm2p\pm4|$$

式中，$k=\pm1,\pm2,\cdots$。

3）为避免定、转子二阶齿谐波作用产生低阶次力波及噪声，应注意避免

$$|Q_s-Q_r|=p\pm1,p\pm2,p\pm3,p\pm4$$

（4）合理选择转子斜槽

当感应电机转子斜槽距为 b_{sk} 时，它所对应的圆心角 $\alpha_{sk}=2b_{sk}/D_r$（D_r 为转子外径）。由转子 μ 次谐波磁场与另一定子谐波磁场相互作用在某一频率下产生的电磁噪声级，设直槽转子时为 L_1，斜槽转子时为 L_2，由于斜槽使该噪声级降低

$$L_1-L_2=20\lg\left[\frac{\sin\left(\frac{\mu\alpha_{sk}}{2}\right)}{\frac{\mu\alpha_{sk}}{2}}\right]$$

转子斜槽后由于径向力沿轴向长度上各处相位不同，可产生扭转力矩，导致铁心扭转振动而产生噪声，这在大中型电机及铁心很长的电机中应特别注意。

（5）增加电机定子刚度及避免机械谐振

增加定子铁心轭的厚度以增加刚性，可降低电机振动及噪声，因此，多极数电机中轭厚不能单纯从磁路计算观点考虑。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

应避免机械谐振，即避免主要的力波频率与定子铁心及机座、端盖等结构件的固有频率接近或吻合。

此外，增大定子铁心或机座结构阻尼，定子铁心与机座采用弹性连接等，均可降低电磁噪声。

2.4.2　降低机械噪声的措施

为降低电机机械噪声，应选用振动噪声较低的轴承，装机前对单个轴承的振动加速度级作测量筛选；适当提高转子轴承档和端盖轴承室的加工精度，以保证较佳的轴承工作游隙；采用波形弹簧片对轴承外圈施加一轴向预压力，以降低转子轴向窜动及由此产生的噪声；严格按操作规程清洗、加注润滑脂和装配轴承。

2.4.3　降低通风噪声的措施

通风噪声是风叶周速、风量、风压等的函数，在电机温升允许情况下，可采用减小风叶直径的方法来减小风量和风压，以降低通风噪声；风扇的合理造型和设计，例如后倾式风扇、轴流风扇比通常采用的径向离心式风扇噪声低，但只允许单方向运转；合理设计风路系统以减小涡流声，并避免风扇与邻近的构件间的间隙过小而产生“笛声”。

此外，采用消声器或隔声罩是降低电机通风噪声的重要措施。

3　电机的电磁兼容性要求

3.1　电磁兼容基本概念

3.1.1　常用的名词术语

(1) 电磁兼容性(EMC)　electromagnetic compatibility

设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。

包含两层意思，一是指设备具有抵抗电磁环境中的其他事物对其干扰的能力，同时也不给其他事物产生侵害，使所有设备都能和谐地共处在一起。

(2) 电磁干扰（EMI）　electromagnetic interference

电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。

(3) 电磁骚扰　electromagnetic disturbance

任何可能引起装置、设备或系统性能降低或者对生物或非生物产生不良影响的电磁现象。

电磁骚扰和电磁干扰表示“起因”和“后果”。

(4) (对骚扰的) 抗扰度　immunity (to a disturbance)

装置、设备或系统面临电磁骚扰不降低运行性能的能力。

(5) 电磁敏感度(EMS)　electromagnetic susceptibility

在有电磁骚扰的情况下，装置或系统不能避免性能降低的能力。

设备处在有电磁骚扰的情况下，抗扰度表示“有能力”，而敏感度表示“没有能力”。设备的敏感度高，意味着抗扰度低。

(6) 差模电压　differential mode voltage

一组规定的带电导体中任意两根之间的电压。

差模电压又称对称电压（symmetrical voltage)。

(7) 共模电压　common mode voltage

每个导体与规定参考点（通常是地或机壳）之间的相电压的平均值。

共模电压又称不对称电压（asymmetrical voltage)。

3.1.2　构成电磁干扰（EMI）的三要素

对设备构成电磁干扰需要具备三个条件：

骚扰源：向外发射电磁骚扰能量的设备。骚扰源有很多，分为自然界的和人为的。电机电器是骚扰源之一。一般的说，用电设备工作时，特别是当电压电流突变时，会产生较强的电磁骚扰。

敏感设备：受骚扰影响的设备。很多设备在电磁环境中都易受干扰，尤其是在低电平状态下工作的信息技术设备，如通信设备、控制设备、计算机等。

耦合路径：指骚扰源的电磁能量传到敏感设备的传递方式。根据不同的耦合方式，把骚扰分为传导骚扰和辐射骚扰。

3.1.3　骚扰的分类

传导骚扰：骚扰能量通过电源线、控制线、信号线、系统的互连线等借助线路传播的电磁骚扰。

辐射骚扰：以电磁波形式通过空间传播的电磁骚扰。通常也包括电磁感应现象。

3.1.4　产品实行 EMC 认证

欧共体从 1996 年 1 月 1 日起对电气电子产品强制执行 89/336/EEC 指令。我国从 2003 年 5 月 1 日起对产品实行 3C 强制认证。国家认证认可监督管理委员会公布的第一批产品，共有 19 大类 132 种。我国实行的 3C 认证包括安全认证和电磁兼容认证，凡符合安全认证要求的产品，在 3C 标志后加下标“S”，凡符合电磁兼容认证要求的产品在 3C 标志后加下标“EMC”。不论外销或内销，电器电子产品必须符合 EMC 认证要求，才能上市场。

3.2　电磁兼容测量和试验标准

3.2.1　EMC 标准体系

EMC 标准分为两大系列：骚扰和抗扰度。我国绝大多数标准等同采用国际标准（IEC/CISPR 和 IEC 61000)。我国的 EMC 标准分为四大类：

1) 基础标准。包括名词术语，通用测试方法，专用测量仪器和辅助设备。如 GB/T 4365《电磁兼容术语》；GB/T 6113《无线电骚扰和抗扰度测量设备和方法规范》；GB/T 17626《电磁兼容　试验和测量技术（抗扰度试验)》等。

2) 通用标准。如 GB/T 17799《电磁兼容　通用标准(抗扰度和发射)》。

3) 产品族（大类）标准。如 GB 4824《工业、科学和医疗（ISM）射频设备电磁骚扰特性　限值和测量方法》；GB 4343《电磁兼容　家用电器、电动工具和类似器具的要求（发射/抗扰度)》；GB 9254《信息技术设备的无线电骚扰限值和测量方法》；GB/T 17618《信息技术设备抗扰度限值和测量方法》；GB 13837《声音和广播电视接收机及有关设备无线电骚扰特性限值和测量方法》等。

4) 产品标准。如 GB 755《旋转电机　定额和性能》第 12 章“电磁兼容性”；GB 12668《调速电气传动系统　第 3 部分：产品的电磁兼容性标准及其特性的试验方法》；GB 14048.6《低压开关设备和控制设备　接触器和电动机起动器　第 2 部分：交流半导体电动机控制器和起动器》等。

3.2.2　电机及有关设备的 EMC 标准和要求

1) GB 755/IEC 60034—1《旋转电机　定额和性能》第 12 章“电磁兼容性”。适用于额定电压不超过交流 1000V/直流 1500V 的旋转电机。标准规定了电机的电磁骚扰限值和测量方法。

2) 骚扰的测量方法按照 GB 4824 的规定。感应电机、无刷同步电机等无刷结构电机运行时的电磁骚扰限值见表 1.7-16，直流电机、同步电机和交流换向器电机应符合表 1.7-17 的要求。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.7-16 电机无刷运行时的电磁骚扰限值

骚扰	频率范围（MHz）	限值
辐射骚扰	30～230	30dB（μV/m）准峰值 在10m距离处①测量
	230～1000	37dB（μV/m）准峰值， 在10m距离处①测量
交流电源端子上传导骚扰	0.15～0.5 限值随频率对数线性衰减	66～56 dB（μV）准峰值 56～46dB（μV）平均值
	0.5～5	56dB（μV）准峰值 46dB（μV）平均值
	5～30	60dB（μV）准峰值 50dB（μV）平均值

① 可以在3m距离处测量，限值增加10dB。

表 1.7-17 电机带电刷运行时的电磁骚扰限值

骚扰	频率范围（MHz）	限值
辐射骚扰	30～230	30dB（μV/m）准峰值， 在30m距离处①测量
	230～1000	37dB（μV/m）准峰值， 在30m距离处①测量
交流电源端子上传导骚扰	0.15～0.5	79dB（μV）准峰值 66dB（μV）平均值
	0.5～5	73dB（μV）准峰值 60dB（μV）平均值

① 可以在10m距离处测量，限值增加10dB。在3m距离处测量，限值增加20dB。

3）GB 12668.3 /IEC 61800-3《调速电气传动系统 第3部分：产品的电磁兼容性标准及其特定的试验方法》。标准规定了电气传动系统（PDS）的抗扰度和骚扰发射要求。适用于调速的交流电动机传动和直流电动机传动，除了牵引和电动车辆以外。

① 抗扰度要求：

（a）低频。谐波和换相缺口/电压畸变：谐波的测量方法见IEC 61000-2-2和IEC 61000-2-4，等级3，验收准则A；换相缺口见GB/T 3859.1，验收准则A。

电压变化，波动，电压跌落和短时中断：电压波动见IEC 61000-2-1和IEC 61000-2-4，等级3，持续时间<1min，验收准则A；电压跌落和中断，见IEC 61000-2-1，验收准则C。

电压不平衡和频率变化：见IEC 61000-2-2和IEC 61000-2-4，等级3。

电源的影响：工频磁场见GB/T 17626.8；脉冲磁场见GB/T 17626.9；阻尼振荡磁场见GB/T 17626.10。

（b）高频。适用于预期只连接到民用供电的公共低压电网上的PDS，见表1.7-18。

第一类环境：指民用环境，同时还包括连接到向民用供电的低压供电电网的应用环境之外的所有环境。

适用于预期用于第二类环境中的PDS，见表1.7-19。

第二类环境：指除了直接连接到向民用供电的低压供电电网的应用环境之外的所有环境。

（c）对电磁场的抗扰度。按GB/T 17626.3规定的要求进行试验。频率范围26～1000MHz，在第一类环境下场强为3V/m，其他为10V/m（不要求进行GB 17626.6《射频电磁场传导抗扰度试验》）。

（d）产品的抗扰度性能判定，见表1.7-20。

表 1.7-18 对预期用于公共环境而不是工业电网的PDS最低的抗扰度要求

端口	现象	参考文件	抗扰度等级	验收准则
机壳端口	静电放电①电磁场	GB/T 17626.2 见GB 12668.3中5.3.3	6kV CD或8kV AD 若CD不可能	B A
电源端口	电快速瞬变浪涌②	GB/T 17626.4 GB/T 17626.5	1kV/5kHz② 1kV（线对线耦合） 2kV（线对地耦合）	B B
电源接口	电快速瞬变	GB/T 17626.4	1kV/5kHz③电容箝位	B
生产过程测量、控制线端口及信号接口	电快速瞬变	GB/T 17626.4	0.5kV/5kHz③电容箝位	B

注 CD—接触放电；AD—空气放电。

① 若成套传动模块（CDM）用开启式机壳或机架式结构或防护等级为IP00时，出于安全上的考虑，试验不可能进行或被禁止进行。对此，制造厂在装置上附一个合适的固定警告标志。

② 电流额定值小于100A的电源端口：使用耦合和去耦网络直接连接。
电流额定值大于或等于100A的电源端口：直接连接或容性耦合夹，不用去耦网络。
若采用容性耦合夹时，试验电平为2kV/5kHz。

③ 仅适用于输入为交流的电源端口，并且只用于备有合适的试验设备的情况下。不应超过基本绝缘的额定脉冲电压（见GB/T 16935.1）。

④ 仅适用于输入电缆总长度按照制造厂的实用规范可能超过2m的端口或接口。

表 1.7-19 预期用于工业环境的PDS的最低抗扰度要求

端口	现象	参考文件	抗扰度等级	验收准则
机壳端口	静电放电①电磁场	GB/T 17626.2见GB 12668.3中5.3.3	6kVCD或8kVAD 若CD不可能	B A
电源端口	电快速瞬浪涌③	GB/T 17626.4 GB/T 17626.5	2kV/5kHz② 1kV（线对线耦合） 2kV（线对地耦合）	B B

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

端　口	现　象	参考文件	抗扰度等级	验收准则
电源接口	电快速瞬变	GB/T 17626.4	2kV/5kHz① 容性耦合夹	B
信号接口	电快速瞬变	GB/T 17626.4	1kV/5kHz③ 容性耦合夹	B
生产过程测量和控制线端口	电快速瞬变	GB/T 17626.4	2kV/5kHz④ 容性耦合夹	B

注　CD—接触放电；AD—空气放电。

① 若成套传动模块（CDM）用开启式机壳或机架式结构或防护等级为 IP00 时，出于安全上的考虑试验不可能进行或被禁止进行。对此，制造厂在装置上附一个合适的固定警告标志。

② 电流额定值小于 100A 的电源端口：使用耦合和去耦网络直接连接。

电流额定值大于或等于 100A 的电源端口：直接连接或容性耦合夹，不用去耦网络。

若采用容性耦合夹，试验电平为 2kV/5kHz。

③ 仅适用于输入为交流的电源端口，并且只用于备有合适的试验设备的情况下。不应超过基本绝缘的额定脉冲电压（见 GB/T 16935.1）。

④ 仅适用于输入电缆总长度按照制造厂的实用规范可能超过 2m 的端口或接口。

表 1.7-20　　PDS 抗电磁骚扰的验收准则

项　目	验收（性能）准则①		
	A	B	C
特定性能：一般的	工作特性未有明显变化在规定的允差之内正常地工作	工作特性有明显的（可见的或可听的）变化，能自行恢复	关机，工作特性变化保护器件触发②，不能自行恢复
特定性能：特殊的转矩特性	转矩偏差在规定的允差内	动态转矩偏差超出规定的允差，能自行恢复	转矩失控，不能自行恢复
子部件性能：电力电子电路和驱动电路的运行	电力半导体器件不击穿	暂时性击穿不会引起驱动系统关机	关机，保护器件触发②不能自行恢复
子部件性能：信息处理和检测功能	与外部器件的通信和数据交换不受骚扰	暂时通信骚扰，不会发出可能引起内部或外部器件关机的错误报告	通信错误，数据和信息丢失不能自行恢复
子部件性能：显示和控制面板的运行	LED 显示信息无变化，只是光亮度略有衰减，或者字符稍有变动	信息有可见的暂时性变化 LED 的亮度不理想	关机，信息永久性丢失或者不允许的工作方式显示出的信息明显错误

① 验收准则 A、B、C 不允许误起动。误起动是指脱离逻辑状态“STOPPED（停止）”的一种未预料到的变化，它可能使电动机运转。

② 在操作人员的干预下（人工复位）可使功能恢复。对于以逆变方式工作的电网换向逆变器，允许保险丝熔断。

②发射要求：

（a）低频：

a）换向缺口。见 GB/T 3859.1。通过时域分析法观察，缺口的测量用深度（d，占 U_{LWM} 的%）和面积（%×度）来表示。

b）谐波和谐间波。谐波计算，见 GB/Z 18039.2—2000/（IEC 61000-2-6：1996）附录 A 的第 1、2 部分。

谐间波计算，见 GB/Z 18039.2—2000/（IEC 61000-2-6：1996）附录 A.3。连接到低压公共电网时，额定电流小于或等于 16A，见 GB 17025.1/IEC 61000-3-2；额定电流大于 16A，见 GB/Z 17625.6/IEC 61000-3-4。

c）电压波动。额定电流小于或等于 16A，见 GB 17025.2/IEC 61000-3-3；额定电流大于 16A，见 GB/Z 17025.3/IEC 61000-3-5。

（b）高频。传导骚扰的测量方法见 GB 4824/ CISPR 11（对于高电压、大电流设备可采用电压探头测量）。

a）电源端骚扰电压限值。

第一类环境，见表 1.7-21。

对第二类环境，其限值正在制定中。

b）电磁辐射骚扰限值。辐射场强测量方法见 GB 4824/ CISPR 11。

第一类环境，见表 1.7-22。

表 1.7-21　　150kHz～30MHz 频段电源端骚扰电压限值—连接到民用电网的设备

PDS 的大小	频　段（MHz）	不受限销售		受限销售	
		准峰值 [dB（μV）]	平均值 [dB（μV）]	准峰值 [dB（μV）]	平均值 [dB（μV）]
小功率传动系统（I<25A）	0.15≤f<0.5	66 随频率的对数下降到 56	56 随频率的对数下降到 46	79	66
	0.5≤f≤5.0	56	46	73	60
	5.0<f≤30.0	60	50	73	60
中等功率传动系统（I≥25A）	0.15≤f<0.5	79	66	79	66
	0.5≤f≤5.0	73	60	73	60
	5.0<f≤30.0	73	60	73	60

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.7-22 30～1000MHz 频段电磁辐射骚扰限值——连接到民用电网的设备

PDS 的大小	频段 (MHz)	不受限销售		受限销售	
		电场强度分量 [dB(μV/m)]	测量距离 (m)	电场强度分量 [dB(μV/m)]	测量距离 (m)
小功率传动系统 (I<25A)	30≤f≤230	30	10	30	30
	230<f≤1000	37		37	
中等功率传动系统 (I≥25A)	0.5≤f≤5.0	30	30	30	30
	5.0<f≤1000	37		37	

第二类环境中的 PDS 对第一类环境中设备的影响，通过对第一类环境中变压器的低压侧进行测量，按第一类环境“不受限销售”的限值考核。

4) GB 14048.6《低压开关设备和控制设备 接触器和电动机起动器 第2部分：交流半导体电动机控制器和起动器》

①发射。测量方法按照 GB 4824。根据设备的使用环境不同，分为 A 类和 B 类。

A 类设备：非家用和不直接连接到住宅低压供电网设施中使用的设备。指用在工业环境中。

B 类设备：家用设备和直接连接到住宅低压供电网设施中使用的设备。

(a) 谐波发射。控制器和起动器的额定电流小于 16A 并接至公共低压配电网时，应符合 GB/T 17625.1 的要求。

(b) 传导射频发射，应符合表 1.7-23 的要求。

(c) 辐射射频发射，应符合表 1.7-24 的要求。

表 1.7-23 传导射频发射的接线端子干扰电压限值

设备等级 (网络型式)		A 类 工业环境		B 类 公用环境	
额定工作电流 I_e	频率 (MHz)	准峰值 [dB(μV)]	平均值 [dB(μV)]	准峰值 [dB(μV)]	平均值 [dB(μV)]
I_e≤100A	0.15～0.5	79	66	66～56①	56～46①
	0.5～5.0	73	60	56	46
	5～30	73	60	60	50
I_e>100A	0.15～0.5	100	90	在考虑中	
	0.5～5.0	86	76	在考虑中	
	5～30	90～70①	80～60	在考虑中	

① 随频率的对数值降低。

表 1.7-24 辐射发射限值

频带 (MHz)	场强[dB(μV/m)]/准峰值	
	设备等级 A①	设备等级 B
30～230	30(在 30m 处测量)	30(在 10m 处测量)
230～1000	37(在 30m 处测量)	37(在 10m 处测量)

① 设备等级 A 允许在 10m 处测量，其限值增大 10dB。

② 抗扰度

(a) 静电放电。试验方法按 GB/T 17626.2，接触放电 4kV，空气放电 8kV。

(b) 射频电磁场。频率范围 0.15～80MHz，试验方法按 GB/T 17626.6，试验等级 140dB (μV)；频率范围 80～1000MHz，试验方法按 GB/T 17626.3，试验等级 10dB (μV/m)。

(c) 电快速瞬变脉冲群。试验方法按 GB/T 17626.4，交流电源端通过耦合/去耦网络，试验等级 2kV/5kHz，1min；控制电路和辅助电路当连接线长度超过 3m 时，通过耦合夹，试验等级为 2kV/5kHz。

(d) 浪涌。试验方法按 GB/T 17626.5，电源线共模 2kV，差模 1kV；连接线当长度超过 3m 时，共模 2kV，差模 1kV。

(e) 电压暂降和短时中断。试验方法按 GB/T 17626.11，试验等级 A，即中断 5000ms，判别等级 3。

3.3 骚扰的测量方法

3.3.1 一般要求

1) 测量仪器。符合 GB 6113/CISPR 16 要求的测量接收机或频谱分析仪，具有准峰值检波器和平均值检波器。

2) 测量条件。环境电平应比受试设备的骚扰限值至少低 6dB。

3) 测量时，受试设备应在典型的状态下运行，并通过改变受试设备的工况以获得骚扰电平的最大值。

3.3.2 传导骚扰测量

9kHz～30MHz。

应有一块接地平板。受试设备 (EUT) 与接地平板之间的关系要相当于实际使用状况。落地式 EUT 放在接地平板上并用一块绝缘板隔开，便携式或其他非落地式 EUT 应放在高出接地平板 0.8m 的非金属台上。

辅助测量设备：人工网络 (AN)，电压探头。

测量端子骚扰电压一般使用人工网络，AN 的性能应符合 GB 6113 的规定。EUT 的有一些端子，如与天线、控制线、信号线和负载线相连接的端子，其骚扰电压测量不能用 AN，则可用电压探头进行测量。此外，当 EUT 的电流大于人工网络的额定电流时，也可使用 AN 进行测量。

EUT 的限值由标准规定，应同时满足用平均值检波器测量时所规定的平均值限值和用准峰值检波器测量时所规定的准峰值限值；或者，用准峰值检波器测量时满足平均值限值。

3.3.3 辐射骚扰测量

30～1000MHz (9kHz～18GHz)。

场强测量可以在开阔试验场、装有吸波材料的屏蔽室(半波暗室 SAR 或全电波暗室 FAR)、混响室中进行，测量的场地应符合 GB 6113 的规定。

EUT 按典型应用情况及产生最大骚扰的方式布置。如果可能，EUT 应放在转台上，使其辐射中心尽可能接近转台的旋转中心。对于通常在台面上工作的 EUT 应将其放置在绝缘台上，高出接地平面 80cm，通常放置在地面上的 EUT 则直接放在金属转台上。

测量的辅助设备：天线，如环形天线、双锥天线、对数周期天线。

受试设备应在服从辐射骚扰限值的规定距离上进行测量，除非因为设备的大小等因素而不能这样做。对置于转台上的 EUT，它和测量天线之间的距离是指转台中心和测量天线之间的水平距离；对于不放在转台上的 EUT，这个距离是指测量天线和受试设备边界之间最近的水平距离。

测量天线应在水平极化和垂直极化两种状态下分别进行测量。在开阔试验场或半波暗室中进行测量时，测量天线距

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

离地平面的高度应在规定的范围内变化（当测量距离为3m或10m时，天线高度为1～4m）。放在转台上的EUT应在0～360°旋转，以测量EUT的最大辐射骚扰场强。

3.3.4 电流谐波和电压波动的测量

电流谐波和电压波动测量仪器和测量方法，应符合GB 17625.1及GB 17625.2的要求。

3.4 抗扰度试验方法

3.4.1 一般试验方法

1）受试设备（EUT）模拟正常工作状态。通常用对EUT施加有用试验信号和无用信号的方法来进行试验。

2）可以用直接辐射或电流/电压注入法来施加试验信号，一般采用两种方法：

①随着严酷度的增加，由小到大逐渐加大试验信号，直到EUT出现性能降低。

②按照标准的规定等级，给EUT施加规定的试验信号，观察EUT的性能是否满足要求。

3.4.2 EUT抗扰度性能判别准则

设备的抗扰度等级通常分为4级，具体由产品标准规定。

1）在技术要求限值内性能正常。

2）功能或性能暂时降低或丧失，但能自行恢复。

3）功能或性能暂时降低或丧失，但需操作者干预或系统复位。

4）因设备（元件）或软件损坏，或数据丢失而造成不能自行恢复至正常状态。

3.4.3 抗扰度试验主要项目

1）静电放电抗扰度，GB/T 17626.2（IEC 61000-4-2）。

2）射频电磁场辐射抗扰度，GB/T 17626.3（IEC 61000-4-3）。

3）电快速瞬变脉冲群抗扰度，GB/T 17626.4（IEC 61000-4-4）。

4）浪涌（冲击）抗扰度，GB/T 17626.5（IEC 61000-4-5）。

5）射频场感应的传导骚扰（注入电流）抗扰度，GB/T 17626.6（IEC 61000-4-6）。

6）工频磁场抗扰度，GB/T 17626.8（IEC 61000-4-8）。

7）脉冲磁场抗扰度，GB/T 17626.9（IEC 61000-4-9）。

8）阻尼振荡磁场抗扰度，GB/T 17626.10（IEC 61000-4-10）。

9）电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度，GB/T 17626，11（IEC 61000-4-11）。

10）交流电源端口谐波、谐间波及电网信号的抗扰度，GB/T 17626.13（IEC 61000-4-13）。

3.5 提高产品EMC的方法

针对骚扰的产生、传播路径和对敏感设备的影响，原理上采用降低骚扰源的发射能量，切断传播路径，提高敏感设备的抗干扰性能来提高产品的电磁兼容性。通常用来抑制骚扰和提高设备抗干扰性能的主要手段有接地、滤波和屏蔽等措施。

1）接地。有安全接地和参考接地两种方式。安全接地是为设备或电路故障电流进入大地提供一个低阻抗通道，防止人身触电。参考接地是设备或电路为了稳定可靠地工作而需要设立一个参考电平，这个参考电平通常由大面积金属导体来提供。作为电位基准的导体称为接地参考平面，它往往都是和大地连接，并和大地取得相等的参考电位。对于抑制骚扰和稳定电路的工作状态，单点接地在低于1MHz频率时是相当有效的。当频率高于10MHz时，由于导线电感和分布电容的影响及系统内各部分之间的电距离较长，应采用多点接地。

2）滤波。根据不同的用途，接在线路中的滤波器可以设计成各种型式。由电容、电感及电阻构成的无源滤波器，最常用的是接在电源线路上的电源滤波器和接在信号线上的信号滤波器，它们既能抑制传导骚扰，也能阻止外部骚扰信号的侵入，提高设备的抗传导干扰性能，不管是共模信号还是差模信号，对模拟信号、数字信号或者尖峰信号都能起到很好的隔离作用。滤波器种类很多，应根据线路的特点选择适合的滤波器，除了插入损耗外，还要注意额定的电压、电流、安装型式、频率特性及线路阻抗和骚扰信号的特征等。

插入损耗是滤波器的主要性能，它的测量方法可参见GB 7343（CISPR 17）。插入损耗

$$A=20\lg(U_1/U_2) \quad (\mathrm{dB})$$

式中，U_1为不接入滤波器时，信号在负载上建立的电压；U_2为信号通过滤波器后在同一负载上建立的电压。

对于电机的传导骚扰，最常用的抑制方法是滤波，可以把容量为0.25～0.5μF的电容器接到电机外壳和端子之间。电机的所有外接电路都应有电容器滤波。电容器的连接线应尽量短，最好安装在接线盒内，并尽可能靠近接线端子。抑制电机骚扰另一个有效的方法是组成对称励磁绕组，即电机绕组不是接到电枢的一边，而是对称地布置在电枢的两边。电机的对称绕组可使线端的骚扰电压降低为原骚扰电压的1/2～1/10。

3）屏蔽。是隔离电磁波，切断辐射信号传播路径的主要方法。无论是较大的电磁屏蔽室、屏蔽箱，还是较小的屏蔽盒，其目的和原理都相同。屏蔽是通过屏蔽板对电磁波的反射、吸收功能来衰减电磁波的能量，因此，屏蔽均采用金属材料（如金属网、金属箔、金属板）。在低频段主要是利用金属材料的吸收性能，常采用有一定厚度的铁磁材料；在高频段，主要利用金属板表面对电磁波的反射特性，因而要求金属板表面要平整和光洁。为了要满足需要的屏蔽效能，应注意电磁波的狭缝效应，屏蔽室须保持整体的电气连续性，在金属板连接处须接触良好，不能有过长的缝和直径过大的洞。屏蔽室的屏蔽性能用“屏蔽效能”来表示

$$S=20\lg(E_1/E_2) \quad (\mathrm{dB})$$

或

$$S=20\lg(H_1/H_2) \quad (\mathrm{dB})$$

式中，E_1（H_1）为没有屏蔽时接收的电场（磁场）强度；E_2（H_2）为经过屏蔽体隔离后接收到的电场（磁场）强度。

要降低设备的辐射骚扰电平，或者想提高辐射抗扰度，一种办法是降低骚扰源的发射电平，另一种办法是将设备屏蔽起来，切断电磁波的传播路径。屏蔽机箱必须科学设计，仔细加工，确保机箱的屏蔽效能满足要求。还要注意设备外露的电源线、信号线、控制线，它们有可能成为发射或接收辐射信号的天线，也要采取相应措施，如使用屏蔽电缆，套上一些合适的铁氧体磁环，通过滤波器隔离等。要在很宽的频率范围内实现兼容，有时候几种方法要一起使用。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第8章 电机试验

1 概述

本章所述的电机试验是指对已装配完成的整机进行的试验。试验的目的是检验电机的质量和性能是否符合相关标准的规定或客户的要求。电机试验视其作用和目的不同可分为型式试验、检查试验、抽样试验、验收试验、现场运行试验、定型试验和研究性试验。

1.1 试验种类

1.1.1 型式试验

型式试验是为了确定电机的电气和机械性能是否符合产品标准和设计要求，并为产品改进提供依据，属下列情况之一者，应进行型式试验：

1）新产品试制完成时。

2）设计或工艺变更导致某些性能发生明显变化时。

3）成批生产电机的定期抽试。

4）检查试验的结果与以前型式试验结果对比超出允许偏差时。

1.1.2 检查试验

检查试验又称出厂试验，其目的是检查出厂产品是否合格，因此，每台新装配完成的电机都要进行检查试验。

1.1.3 其他试验

1）抽样试验。为了较真实地反映产品品质，按规定的抽样原则，从一批产品中随机抽取若干台进行试验。

2）验收试验。一般有用户在场时进行，以便向用户表明电机符合标准或合同条款的要求。汽轮发电机和大型水轮发电机都要进行验收试验。

3）现场运行试验。电机在现场正常工作状况下进行试验，以表明该电机安装和接线正确，并能投入正常运行。大型电机、汽轮发电机和水轮发电机经过一定期限运行后都要进行该试验。

4）定型试验。在电机产品定型鉴定时所需进行的试验。

5）研究性试验。在设计新型电机、验证新的工艺、拟订新的设计方法、采用新线路或新材料时，为了掌握有关参数或性能的系统资料所需进行的试验。

1.2 试验电源

电机的性能与试验电源的品质有关，只有使用符合要求的电源且仔细正确测量才能求得准确的试验结果。

1.2.1 一般交流电动机试验电源（见 GB 755 中 6.2.1.条）

对于由交流发电机供电且频率固定的试验电源，应符合下列要求。

1）线电压波形。试验电压的谐波电压因数（HVF）应不超过（见 GB 755 中 6.2.1.1 条）：

① 0.03——N 设计电动机（见 JB/T 8158）。

② 0.02——未加说明的其他电动机。

热试验时，试验电源的谐波电压因数（HVF）应不超过 0.015。

2）线电压系统的对称性。三相电压系统的负序分量应小于正序分量的 0.5%，且零序分量的影响应予消除（见 GB 755 中 7.3.1 条）。

3）频率。试验期间，电源频率与规定频率之差应在规定频率的±0.3%范围内。频率的偏差会直接影响到测得的效率值。

测量期间不允许频率发生快速变化，因为频率快速变化不仅影响被试电机，也会影响到输出测量装置。读数时频率变化量应小于规定值的 0.1%。

1.2.2 变频器供电交流电动机试验电源（见 GB 755 中 6.2.1.2 条）

对于由静止变频器供电且频率可调的试验电源，应允许电源电压有较高的谐波含量，对于 IEC 60034-12 适用范围内的笼型感应电动机见 IEC 60034-17。

注：电源线电压明显为非正弦波时，例如，由静止变频器供电时，其全波和基波电压有效值均与所测交流电动机性能密切相关。

1.2.3 直流电动机试验电源

直流电机试验电源有直流发电机组、静止整流电源、蓄电池、直流稳压电源等。试验用静止整流电源的电流纹波系数或波形因数应符合被试电动机技术条件的要求，整流器交流输入的多相电压应对称，输出电压、电流的纹波系数[(最大波幅－最小波幅)/(最大波幅＋最小波幅)]小于 0.1。

1.3 测量仪器

1.3.1 一般要求

因为大多数仪器的准确度等级通常以满量程的百分数表示。因此，应尽量按实际读数的需要，选择低量程仪表。

影响仪器测量结果准确度的因素：

1）信号源负载。

2）引接线校正。

3）仪器的量程、使用条件和校准。

1.3.2 电量测量仪器

通常，电量测量仪器的准确度应不低于 0.5 级（兆欧表除外）。测定电机效率时，为保持试验结果的准确性和重复性，要求仪器的准确度等级不低于 0.2 级。

一般说来，电子仪器是多用途的，与无源仪器（非电子式）相比，有非常大的输入阻抗，无需因仪器自身损耗而修正读数。但高输入阻抗仪器对干扰更为敏感，应依实践经验，采取减少干扰的措施。

1.3.3 仪用互感器

测量用仪用互感器的准确度等级应不低于 0.2 级。

1.3.4 转矩测量仪

一般试验用转矩测量仪（含测功机和传感器）的准确度等级应不低于 0.5 级。

测定效率时，转矩测量仪的准确度等级应不低于 0.2 级。

1.3.5 转速与频率测量仪

转速表读数误差在±1r/min 以内。频率表的准确度等级应不低于 0.1 级。

1.3.6 电阻测量仪

绕组的直流电阻用双臂电桥或单臂电桥，或数字式微欧

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

计测量，准确度应不低于0.2级。

1.3.7 温度测量仪

温度测量仪的最大允许误差为±1℃。

1.4 测量要求

1.4.1 电压测量

测量端电压的信号线应接到电机端子，如现场不允许这样连接，应计算由此引起的误差并对读数作校正。对于三相电机，取三相电压的算术平均值计算电机性能。

1.4.2 电流测量

对于三相电机，应同时测量电动机的每相线电流，用三相线电流的算术平均值计算电机的性能。

使用电流互感器时，接入二次回路仪器的总阻抗（包括连接导线）应不超过其额定阻抗值。

对 $I_N<5A$ 的电动机，除堵转试验外，不应使用电流互感器。

1.4.3 功率测量

应采用两表(两台单相功率表)法测量三相电动机的输入功率，也可采用一台三相功率表或三台单相功率表测量输入功率。

如仪器仪表损耗影响试验结果的准确性，应对仪器仪表损耗及其误差进行修正。

1.4.4 转矩测量

应使用合适规格的转矩测量仪进行负载试验。

除堵转试验、最大转矩和最小转矩的测量外，转矩测量仪的标称转矩应不超过被试电机额定转矩的2倍。在被试电机为额定转速时，测得的联轴器及测功机（或负载电机）的风摩损耗应不大于被试电机额定输出的15%，转矩变化的敏感度应达到额定转矩的0.25%。应极为仔细准确地测量机械功率。

1.4.5 转速和转差的测量

用数字式测速仪测量转速。如用感应线圈法或闪光测速仪直接测量转差，其电源应为被试电机电源。

1）闪光法。在电机转轴的端面上，画出与电机极数相同数量的扇形片，并用荧光灯或氖灯照明。供给闪光灯具的电源频率必须与被试电机的电源频率相同。试验时，用停表测定扇形片转动 N 次所需的时间 t(s)，转差率 s_t(r/min)按下式计算

$$s_t = 60N/t \qquad (1.8\text{-}1)$$

2）感应线圈法。在电动机轴伸附近，放置一只带铁心的多匝线圈，线圈与磁电式检流计或阴极示波器连接。试验时，用停表测定检流计指针或示波器波形全摆动 N 次所需的时间 t(s)，转差率 s_t(r/min)按下式计算

$$s_t = 60N/pt \qquad (1.8\text{-}2)$$

1.4.6 读数程序

在任何试验中，在读取一系列逐步增加或逐步减少的数据时，应注意，不得改变增加或减少的操作顺序，以避免颠倒试验的进行方向。

1.4.7 安全

由于涉及危险的电流、电压和机械力，对所有试验应采取安全预防措施，所有试验应由有相关知识和有经验的人员操作。

2 一般试验项目

2.1 绝缘电阻的测定

2.1.1 绕组对机壳及其相互间绝缘电阻的测定

1）测量时电机的状态。测量电机绕组的绝缘电阻时应分别在电机实际冷状态和热状态（或温升试验后）下进行。检查试验时，如无其他规定，则绕组对机壳及绕组相互间的绝缘电阻仅在冷状态下测量。测量绝缘电阻时应测量绕组温度，但在实际冷状态下测量时可取周围介质温度作为绕组温度。

2）测量方法。测量绕组绝缘电阻时，如果各绕组的始末端单独引出，则应分别测量各绕组对机壳及绕组相互间的绝缘电阻，这时，不参加试验的其他绕组和埋置检温元件等均应与铁心或机壳作电气连接，机壳应接地。当中性点连在一起而不易分开时，则测量所有连在一起的绕组对机壳的绝缘电阻。

绝缘电阻测量结束后，每个回路应对接地的机壳作电气连接使其放电。

测量水内冷绕组的绝缘电阻时，应使用专用的绝缘电阻测量仪，在绝缘引水管干燥或吹干的情况下，可用普通绝缘电阻表测量。

不能承受兆欧表高压冲击的电器元件（如半导体整流器，半导体管及电容器等）应在测量前将其从电路中拆除或短接。

测量时，在指针达到稳定后再读取数据，并记录绕组的温度。

若测量吸收比，则吸收比 R_{60}/R_{15} 应测得15s和60s时的绝缘电阻值。

若测量极化指数，则极化指数 R_{10}/R_1 应测得1min和10min时的绝缘电阻值。

2.1.2 其他绝缘电阻的测定

1）轴承绝缘电阻的测定。轴承绝缘电阻的测定用不高于1000V的绝缘电阻表测量。

2）埋置检温计绝缘电阻的测定。埋置检温计的绝缘电阻测定按JB/T 10500.1规定的方法进行。

3）加热器绝缘电阻的测定。加热器绝缘电阻的测定按JB/T 7836.1规定的方法进行。

2.1.3 绝缘电阻表的选用

测量绕组对机壳及绕组相互间的绝缘电阻时，应根据被测绕组的额定电压按表1.8-1选择绝缘电阻表。

表1.8-1 绝缘电阻表规格

被测绕组额定电压 U_N(V)	绝缘电阻表规格(V)
$U_N<1000$	500
$1000\leqslant U_N\leqslant 2500$	500～1000
$2500\leqslant U_N\leqslant 5000$	1000～2500
$5000\leqslant U_N\leqslant 12000$	2500～5000
$U_N>12000$	5000～10000

2.2 介电强度试验

2.2.1 工频耐电压试验

试验电源的频率为工频，电压波形应尽可能为正弦波形。

(1) 试验要求（见GB 755中8.1条）

1）耐电压试验在电机静止的状态下进行。试验前，应先测量绕组的绝缘电阻。如需要进行超速和短时过转矩试验时，该项试验应在这些试验之后进行，型式试验时，该项试验还应在热试验后电动机接近热状态下进行。

2）试验时，电压应施于绕组与机壳之间，此时其他不参与试验的绕组均应和铁心及机壳连接。对额定电压在1kV以上的电机，若每相的两端均单独引出时，则应每相逐一进

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

行试验。

3）试验变压器应有足够的容量，可按下列方法选择：

对低压电动机，每1kV试验电压，试验变压器的容量应不小于1kVA。

对高压电动机，其电容量较大时，试验变压器的容量应大于下式求得的计算容量

$$S_T = 2\pi f C U_t U_{TN} \times 10^{-3} \quad (\text{kVA}) \qquad (1.8\text{-}3)$$

式中，C为被试电机的电容量，F；U_t为试验电压，V；U_{TN}为试验变压器高压侧的额定电压，V。

对分马力电动机，每1kV试验电压，试验变压器的容量应不小于0.5kVA。

4）额定电压在3kV及以上的电动机进行耐电压试验时，建议在试验变压器接线柱与被试绕组之间并联接入放电铜球，试验电压应在试验变压器的高压侧进行测量。

5）试验前，应采取切实安全防护措施，试验中发现异常情况，应立即切断试验电源，并将绕组对地放电。

（2）试验电压和时间

试验电压的数值按GB 755表14或各类电机标准的规定。

试验应从不超过试验电压全值的一半开始，然后均匀地或以每步不超过全值5%逐步增至全值，电压从半值增至全值的时间应不小于10s。全值试验电压值应符合GB 755表14的规定，并维持1min。

当对批量生产的5kW（或kVA）及以下电机进行常规试验时，1min试验可用约5s的试验代替，试验电压按GB 755表14规定的正常值。也可用1s试验来代替，但试验电压值应为GB 755表14规定值的120%，试验电压均用试棒施加。

2.2.2 短时升高电压试验

试验在电机空载时进行，除下列规定外，试验时外施电压（电动机）或感应电压（发电机）均为130%额定电压值。

对励磁电流额定而空载电压超过额定电压的130%的同步电机，试验电压应为励磁电流额定时的空载电压，水轮发电机的试验电压应等于额定电压的150%。四极以上直流电机，试验时应使换向器相邻片间电压不超过24V。对三相绕线转子异步电动机（2、4极大型电动机除外）及交流换向器电动机，试验应在转子静止及开路时进行。

除下列电机外，短时升高电压时间为3min。

（1）对水轮发电机和汽轮发电机，绕组为单匝线圈的，试验时间为1min；为多匝线圈的，试验时为5min。

（2）对在130%额定电压下空载电流超过额定电流的电机，试验时间可缩短至1min。

（3）提高试验电压至额定电压130%时，允许同时提高频率或转速，但应不超过额定转速的115%或超速试验所规定的转速。

对磁路比较饱和的发电机，在转速增加至115%，且励磁电流已增加至允许限值时，若感应电压不能达到所规定的试验电压，允许在所能达到的最高电压下进行试验。

2.2.3 直流耐电压试验和泄漏电流的测量

直流耐电压试验与泄漏电流的测量是同时进行的。电枢绕组绝缘应能承受3.5倍额定电压U_N，直流耐电压试验时间为1min。在$2.5U_N$的直流电压作用下，最大泄漏电流越过20μA时，各相泄漏电流的差值应不大于最小一相泄漏电流值的50%，且试验时泄漏电流应不随时间的延长而增大。

2.2.4 匝间冲击耐电压试验

匝间冲击耐电压试验按JB/T 10098，JB/T 9615.1和JB/T 9615.2规定的方法进行。

2.3 轴电压的测定

2.3.1 轴电压和轴电流

轴电压、轴电流是由于环绕电机轴的磁回路不对称、转子运转不同心，或由于轴承中具有绝缘性能的油膜所引起的静电充电以及有接缝的机座或铁心拼片不当等因素而导致轴磁化或感生脉动磁通所产生的。它将使轴—轴承—底板（或机座）的回路中有轴电流流过。一般通过滚动轴承的最大电流密度不得超过1.5A/mm²，否则轴承性能将严重恶化；滑动轴承的情况稍好些，但时间一长，轴瓦和轴承处将出现点状微孔并在其底部有发黑现象。

2.3.2 测量方法

使被试电机在额定电压下空载运行，用高内阻电压表测定轴两端的轴电压U_1，然后将轴的一端与轴承座短接，测另一轴承座对地的轴电压U_2，如图1.8-1所示。为了保证接触良好，可用铅笔芯作引线。也可采用交流电流表接在转轴两端测出电流值。电流表量程大于或等于60A，其连接线应短而粗，与轴接触的一端可采用电刷或接触棒。

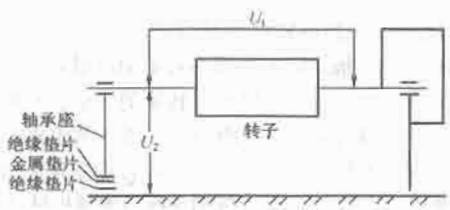


图1.8-1 轴电压测量

2.4 超速试验

若无其他规定，超速试验允许在冷态下进行。

超速试验前应仔细检查电机的装配质量，特别是转动部分的装配质量，防止转速升高时有杂物或零件飞出。

超速试验时应采取相应的安全防护措施，对被试电机的控制及对振动、转速和轴承温度等参数的测量，应采用远距离测量方法。

超速试验可根据具体情况选用电动机法（提高电源频率）或原动机拖动法。

在升速过程中，当电机达到额定转速时，应观察电机运转情况，确认无异常现象后，再以适当的加速度提高转速，直至规定的转速。超速值及持续时间按GB 755中相应条款或该类型电机标准规定。

超速试验后应仔细检查电机的转动部分是否有损坏或产生有害的变形，紧固件是否松动以及其他不允许的现象出现。转子绕组在试验后，必须满足耐电压试验的要求。

2.5 转动惯量的测定

转动惯量可按GB/T 1032中14.6条所述的方法测定。

2.6 振动和噪声的测定

（1）振动的测定按GB 10068规定的方法测定。

（2）噪声的测定按GB/T 10069.1和GB/T 10069.2规定的方法测定。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3 确定损耗和效率试验方法的通用要求

本章3、4、5、6节是有关确定电机损耗和效率的试验方法部分，为便于查阅，对其中常用的主要符号、单位和下标作如下规定：

（1）主要符号和单位

P 功率，W（或kW）
U 电压，V
I 电流，A
R 电阻，Ω
f 频率，Hz
n 转速，r/min
θ 温度，℃
X 电抗，Ω
Z 阻抗，Ω
s 转差率，标么值

（2）下标

0 空载
N 额定
1 定子
2 转子
a 电枢
f 励磁

3.1 效率

以相同单位表示的输出功率对输入功率之比，通常以百分数表示。

（1）直接法确定效率。通过试验直接测量电机输出功率和输入功率，确定效率的方法，称为直接法。

（2）间接法确定效率。通过试验测量电机的输入功率或输出功率并确定总损耗。总损耗与输出功率相加即得输入功率，或从输入功率中减去总损耗即得输出功率。以输入或输出功率和总损耗确定效率的方法，称为间接法，又称损耗分析法。

确定电机效率的各种方法都基于若干假设，因此，用不同方法求得的效率值不能直接相互作比较。

3.2 损耗

总损耗为输入功率与输出功率之差，等于恒定损耗、负载损耗、负载杂散损耗和励磁回路损耗之和。

3.2.1 恒定损耗

铁损耗与风摩损耗之和。

1）铁损耗。P_{Fe}磁路中的铁损耗及其他金属件中的空载杂散损耗。

2）风摩损耗P_{fw}：

①摩擦损耗。轴承及在额定工况下未提起的电刷产生的摩擦损耗，但不包括独立润滑系统中的损耗。公用轴承，不论是否随机供应，应单独确定其损耗。

需要注意的是：

(a) 如需要独立润滑系统中的损耗，应单独列出。

对于立式电机，应测定推力轴承的损耗，但外推力除外。

(b) 由外推力产生的额外损耗，按协议应单独确定，因此协议中应包括推力负载、轴承温度、润滑油型号和油温。

(c) 由推力负载产生的摩擦损耗按协议可包括在内。

如果被试电机轴承采用直接循环冷却，被试电机和与其机械连接的机器（如透平机）之间轴承损耗的分配与二者旋转体的质量成比例。如果不是直接循环冷却，按协议，轴承损耗的分配宜按经验公式确定。

②风阻损耗。电机全部旋转零件空气动力摩擦产生的损耗，包括安装在电机轴上的风扇和与电机成为一体的辅机所消耗的功率。

注：独立通风系统中的损耗应单独列出。对直接或间接氢冷电机见GB755的适用条款。

3.2.2 励磁回路损耗

励磁绕组损耗、励磁机损耗及同步电机电刷（如有）电损耗之和。

3.2.3 负载损耗

绕组I^2R损耗和电刷（如有）电损耗之和。

1）对于直流电机，电枢回路的I^2R损耗。

2）对于感应电机，定子和转子绕组的I^2R损耗。

3）对于同步电机，电枢绕组的I^2R损耗。

3.2.4 负载杂散损耗

负载电流在有效铁心及除导线外其他金属件引起的损耗；因磁通脉振在绕组导体中产生的涡流损耗及换向引起的附加电刷电损耗。

注：负载杂散损耗不包括铁损耗中的空载杂散损耗。

3.2.5 短路损耗

同步电机和直流电机，在其电枢绕组短路时，电流引起的损耗。

3.3 确定效率的试验方法

确定效率的试验方法可分为如下三种类型：

1）测量单一电机的输入和输出功率，即测量一台电机的电或机械输入功率和机械或电输出功率。

2）测量对拖试验的两台完全相同电机的输入和输出功率。本法不需要测量被试电机的输入或输出机械功率。

3）测量规定条件下电机的实际损耗，通常不是测总损耗而是测各分项损耗，但可计算总损耗或计算某一项损耗。

总损耗可用下述一种方法确定：①测量总损耗；②确定各分项损耗，以求总损耗。

3.4 被试电机的状态

1）被试电机应是基本部件就位装配好的电机，以达到试验条件等于或非常接近正常工作条件。

2）试验程序中的各分项试验最好按所列的先后顺序进行，但也不必在一项试验之后立即进行另一项试验。如果各分项试验延期进行或单独进行试验，则应在测取试验数据之前，重新建立起规定的热状态。

3）对电刷位置可调的电机，电刷应放在对应于规定定额的位置。对于有举刷装置的绕线转子感应电动机，试验时电刷举起并将转子绕组短路。为了对直流电机进行空载测试，电刷应在中性线的位置上。

4）如果类似结构的电机，经足够长工作时间证明密封摩擦损耗已无足轻重，则试验时，可取下密封元件。

3.5 试验电阻的测定

3.5.1 绕组在实际冷却状态下直流电阻的测定

绕组的直流电阻可用电桥法、微欧计法、电压表电流表法或者其他测量方法测量。

1）当使用自动检测装置、数字式微欧计等仪器测量绕组的直流电阻时，通过被测绕组的试验电流应不超过其额定

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

电流的 10%，通电时间不超过 1min。

2）使用电桥测量时，每一电阻应测量三次，每次应在电桥平衡破坏后重新进行测量，每次读数与三次读取数据的平均值之差应在平均值的±0.5%范围内，取其平均值作为电阻的实际测量值。如绕组的直流电阻在 1Ω 以下时，应采用有效数不低于 4 位的双臂电桥测量。

3）使用电压表电流表法测量时，接线原理如图 1.8-2 所示。图中 R_b 为可调限流电阻，R 为被试电机绕组，V 为电压表，A 为电流表。图 1.8-2（a）的接线适用于测量电压表内阻与被测电阻之比大于 200 时绕组的电阻，图 1.8-2（b）的接线适用于测量电压表内阻与被测电阻之比小于 200 时绕组的电阻。

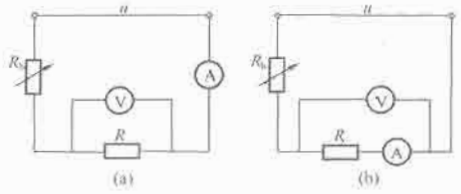


图 1.8-2 用电压表电流表法测量直流电阻接线原理图

试验时，所加电流应不超过绕组额定电流的 10%，通电时间不超过 1min，测量时应同时读取电流及电压值，每一电阻至少应在三种不同电流值下进行测量，每个测量值与平均值相差应在±0.5%范围之内，取其平均值作为电阻的实际测量值。

4）测量电枢绕组时，电机的转子静止不动。绕组的各相各支路的始末端均引出时，应分别测量各相各支路的直流电阻。

对于三相电机，通常在每个出线端间测量端电阻，各相电阻值按下式计算：

对星形联结的绕组，如图 1.8-3（a）所示

$$R_U = R_{med} - R_{VW} \tag{1.8-4a}$$

$$R_V = R_{med} - R_{WU} \tag{1.8-4b}$$

$$R_W = R_{med} - R_{UV} \tag{1.8-4c}$$

对三角形联结的绕组，如图 1.8-3（b）所示

$$R_U = \frac{R_{VW}R_{WU}}{R_{med} - R_{UV}} + R_{UV} - R_{med} \tag{1.8-5a}$$

$$R_V = \frac{R_{WU}R_{UV}}{R_{med} - R_{VW}} + R_{VW} - R_{med} \tag{1.8-5b}$$

$$R_W = \frac{R_{UV}R_{VW}}{R_{med} - R_{WU}} + R_{WU} - R_{med} \tag{1.8-5c}$$

式中，$R_{med} = (R_{UV} + R_{VW} + R_{WU})/2$，$R_{UV}$、$R_{VW}$ 和 R_{WU} 分别为出线端 U 与 V、V 与 W 和 W 与 U 之间测得的端电阻值，Ω；R_U、R_V 和 R_W 分别为各相的相电阻，Ω。

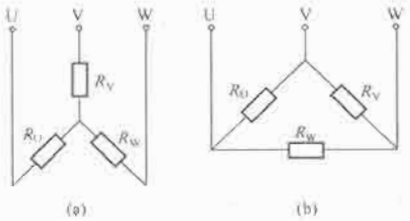


图 1.8-3 测量电枢绕组接线原理图

5）励磁绕组的直流电阻应在绕组引至集电环的接线端或集电环表面测量，自励恒压发电机励磁装置绕组的直流电阻应在绕组的出线端上单独进行测量。

6）测量电阻时，必须同时测量绕组的温度（见本章 3.6.1 节）。

3.5.2 热电阻的测定

热电阻与冷态电阻应使用同一电阻测量仪在绕组的同名端测量。在规定（例如额定负载）热试验结束时绕组热电阻 R_N 按 GB 755 中 7.6.2.3 条规定的外推法确定。用热电阻 R_N 按 GB 755 中 7.6.2.2 条所列公式确定绕组平均工作温度 θ_N。

3.5.3 试验温度下绕组电阻的确定

在确定电机的性能时，需要计算在试验状态下绕组的 I^2R 损耗。这就需要确定试验过程中每个读数点处的绕组电阻。确定试验状态下绕组电阻的方法，可以用埋置热电阻温度计法，通过测量绕组温度的方法确定电阻，也可用断电时（外推到断电瞬时）的电阻作为试验过程中的电阻，或其他可用的方法。

3.6 绕组温度的确定

3.6.1 实际冷状态下绕组初始温度的测定

将电机在室内放置一段时间，用温度计（或埋置检温计）测量电机绕组、铁心和环境温度，所测温度与冷却介质温度之差应不超过 2K。对大中型电机，温度计应有与外界隔热的措施，且放置温度计的时间应不少于 15min。

测量电枢绕组和辅助绕组（如自励恒压发电机谐波绕组等）温度时应根据电机的大小，在不同部位测量绕组端部和绕组槽部的温度（有困难时可测量铁心齿和铁心轭部表面温度），取平均值作为绕组的实际冷却状态下温度。

测量凸极式电机的励磁绕组温度时，可在绕组表面若干处直接测量温度，取其平均值作为绕组的实际冷状态下温度。

测量隐极式电机的励磁绕组温度时，应测量绕组表面的温度，有困难时可用转子表面温度代替，对大中型电机，测点应不少于三点，取其平均值作为绕组的实际冷状态下温度。

测量自励恒压发电机的励磁装置绕组（如变压器、电抗器绕组等）温度时，应用温度计测量铁心或绕组的表面温度作为绕组的实际冷却状态下温度。

对于液体直接冷却的绕组在通液体的情况下，可在绕组进、出口处液体的温度之差不超过 1K，铁心温度与环境温度相差不超过 2K 时，取绕组进出口液体温度的平均值作为绕组的实际冷状态下温度。

3.6.2 绕组工作温度 θ_N

绕组工作温度按下述一种方法确定（按优先次序）。

1）根据额定负载热试验电阻 R_N，按 3.5.2 节所述的方法确定工作温度 θ_N。

2）对同一结构设计和电磁设计完全相同的电机，按本条 1）确定的工作温度。

3）按 ETD 或热电偶温度计测定的温度。

4）无合适的负载时，按 IEC61986 确定绕组工作温度。

5）不能直接测量额定负载热电阻时 R_N 时，假定绕组温度等于表 1.8-2 列出的额定热分级的基准温度 θ_{ref}。

表 1.8-2 基 准 温 度

绝缘系统热分级	基准温度（℃）
120（A、E）	75
130（B）	95
155（F）	115
180（H）	135

3.6.3 计算损耗用绕组的规定温度 θ_s

规定温度 θ_s 是 3.6.2 条中按 1）～4）确定的绕组工作温度 θ_N 修正到 25℃时的绕组温度

$$\theta_s = \theta_N + 25 - \theta_c \tag{1.8-6}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式中，θ_s 为规定温度；θ_N 为绕组工作温度（见 3.6.2）；θ_c 为确定 θ_N 时的冷却介质温度。

对于不进行热试的电机 $\theta_s=\theta_{ref}$。

3.7 效率测量不确定度

测量不确定度是与测量结果相联系的参数，表征合理赋予被测量之值的分散性。效率测量不确定度是指所测实际效率的不确定度，它反映试验方法和测试仪器的偏差。不确定度小，表示分散性小。

3.7.1 相对不确定度

不确定度本应以数值表示，但这需要足够多的试验数据以确定其代表性和可比较性。本处用下述相对不确定度，以表明不同试验方法之不确定度的相对差别。

①“小”适用于根据试验结果确定效率的试验方法。

②“中”适用于根据有限近似值确定效率的试验方法。

③“大”适用于根据若干假设确定效率的试验方法。

3.7.2 优选试验方法

制定测试效率的具体细则是困难的，试验方法的选择取决于所需要的性能参数和准确度、被试电机的型式和容量大小及现场可用试验设备（电源、负载或驱动电机）。

表 1.8-3a～表 1.8-3c 列出了各类电机的试验方法及其不确定度，应优先选择不确定度小的试验方法。

表 1.8-3a 直流电机

方法	适用于	所需设备	不确定度
直接法			
输入—输出法	电机中心高 $H\leqslant180$	可测量满载转矩的转矩仪或测功机	小
总损耗法			
单电源对拖回馈法	两台完全相同的电机	升压发电机	小
损耗分析法（做负载试验）			
P_s 直流分量：单电源对拖回馈法	两台完全相同的电机	升压发电机	小
P_s 直流分量：推荐值			中
P_s 交流分量：按规定的整流电源	电机中心高 $H\leqslant180$	规定的整流器	小
损耗分析法（不做负载试验）			
按负载与空载励磁电流的指定比，确定励磁损耗。P_s 按推荐值		如试验设备不能做其他试验（不能加负载，无完全相同的电机）	大

注 1. 由于测试仪的误差，直接法限于测试效率在 95%及以下的电机。实际上，直接法用于 $H\leqslant180$ 的电机，其效率不可能超过 95%。效率低于 95%的大型电机也可用直接法测试。

2. 在不确定度一栏中，“小”表示该方法中的所有损耗均由试验确定；“中”表示该方法是基于简化的电机数学模型；“大”表示该方法中并非所有损耗都是由试验确定的。

表 1.8-3b 感应电机

方法	适用于	所需设备	不确定度
直接法			
输入—输出法	全部单相电机及功率小于 1kW 的多相电机	可测量满载转矩的转矩仪或测功机	小
双电源对拖回馈法	两台完全相同的电机	能承受满载的变频机组或变频器	小
总损耗法			
单电源对拖回馈法	两台完全相同的绕线转子电机	低频（电压、频率）可调电源	小
损耗分析法（做或不做负载试验）			
剩余损耗法确定 P_s	功率为 1～150kW 三相电机	转矩仪或测功机的标称定额大于或等于 1.25 倍满载转矩	小
P_s 为推荐值			中至大
反转法确定 P_s		辅助电机的额定功率小于或等于 5 倍被试电机总损耗	中至大
Eh-star 法确定 P_s		电阻器的电流为 1.5 倍额定相电流	中（见本表注 3）
损耗分析法（不做负载试验）			
等效电路法 P_s 为推荐值		如试验设备不能做其他试验（不能加额定负载，无完全相同的电机）	中/高

注 1. 由于测试仪器的误差，由剩余损耗确定 P_s，限于相关系数大于 0.95，且所测效率的不确定度有可能超过±0.5%。

2. 在不确定度一栏中，“小”表示该方法中的所有损耗均由试验确定，“中”表示该方法是基于简化的电机数学模型。

3. 用 Eh-star 法确定 P_s，适用于 1kW 到 150kW 范围内的电机，对更大容量的电机正在研究中。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.8-3c 同步电机

方法	适用于	所需设备	不确定度
直接法			
输入—输出法	中心高 $H\leqslant 180$ 的电机	可测量满载转矩的转矩仪或测功机	小
对电源对拖回馈法	两台完全相同的电机		中
总损耗法			
零功率因数法（以波梯系电抗或 ASA 或瑞典相量图确定励磁电流）		电源能供给满载电压和满载电流	中
单电源对拖回馈法	两台完全相同的电机		小
损耗分析法（做负载试验）			
除 P_s 外其他损耗之和		可进行满载试验机组	大
由短路试验确定 P_s	中心高 $H\leqslant 180$ 的电机		小
损耗分析法（不做负载试验）			
由波梯系电抗或 ASA 或瑞典相量图确定励磁电流。由短路试验确定 P_s		如试验设备不能做其他试验（不能加额定负载，无完全相同的电机）	中

注 1. 由于测量仪器的误差，直接法限于测试效率在 95%～96%及以下的电机。实际上，本标准推荐的直接法用于 $H\leqslant 180$ 的电机，其效率不可能超过 95%。对于效率低于 95%～96%的大型电机也可用直接法测试。

2. 在“不确定度”一栏中，“小”表示该试验方法中全部损耗均由试验确定；“中”表示该试验方法是基于简化的电机数学模型；“大”表示该方法中并非所有损耗都是由试验确定的。

4 三相感应电动机确定损耗和效率的试验方法

4.1 输入—输出法

被试电动机与负载电机连接，测试应在规定的热试验结束时进行。试验时测量并记录 U、I、P_1、n、T、f、θ_c。

试验线路原理图如图 1.8-4 所示。

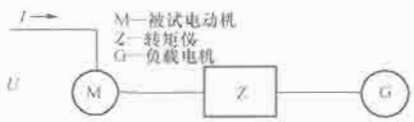


图 1.8-4 输入—输出法原理图

效率为

$$\eta = P_2/P_1 \tag{1.8-7}$$

式中，P_1 为输入功率；T 为转矩；n 为转速；$P_2 = Tn/9.459$。

4.2 双电源对拖回馈法

两台完全相同的电机机械上连接在一起（见图 1.8-5）。

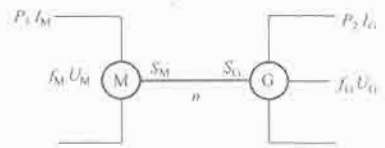


图 1.8-5 双电源对拖回馈法原理图

其中一台 M 作为电动机运行，另一台 G 作为感应发电机运行。感应发电机的出线端与变频机组或变频器（低谐波）连接，机组或变频器供应无功功率并吸收有功功率。M 电机为额定电压和额定频率，G 电机作为发电机时其电源频率低于 M 电机，调节 G 电机的电压能保持额定的电压/频率比不变。

颠倒电动机和发电机的接线并重复试验，但每台电机的仪表和仪用互感器的接线不变。测试应在规定的热试验结束时进行，每次试验记录：

电动机：U_M、I_M、P_1、f_m、S_M。

发电机：U_G、I_G、P_2、f_G、S_G、Q_C。

如两台完全相同的电机基本上运行在相同的额定工况时，则可按电动机和发电机总损耗的一半和平均输入功率计算效率

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2}} \tag{1.8-8}$$

式中，$P_T = (P_1 - P_2)/2$。

4.3 单电源对拖回馈法——适用于绕线转子感应电动机

以单电源对拖法确定电机的总损耗。

两台相同的电机机械上连接在一起，如图 1.8-6 所示。两台电机的定子接到同一电源，这样两台电机在额定转速和额定电压下运行。一台作为电动机，其转子绕组短路，另一台作为发电机，其转子绕组由多相低频电源（低频旋转磁场方向与转子转向相同）供电，通过调节低频励磁电源的频率和电流，调节电动机的负载。测试应在规定的热试验结束时进行。

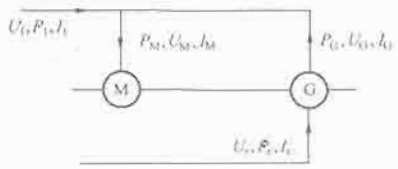


图 1.8-6 绕线转子感应电动机单电源对拖回馈法原理图

测量并记录：

1) U_1，P_1，I_1，主电源。

2) U_r，P_r，I_r，低频电源。

3) P_M，电动机吸收的功率。

4) P_G，发电机输出功率。

5) θ_c，冷却介质温度。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

如两台完全相同的电机基本上在额定工况下运行时，用两台电机总损耗的一半，计算电机的效率

$$\eta = 1 - P_T / P_M \qquad (1.8\text{-}9)$$

式中，P_M 为电动机输入功率；电动机的总损耗 $P_T = (P_1 + P_2)/2$。

4.4 损耗分析法

感应电动机大多用损耗分析法确定损耗和效率。因此损耗分析法是应用最广泛的一种方法。损耗分析法的主要内容是确定电动机的各分项损耗，以确定电动机的效率。电动机的各分项损耗是：风摩损耗 P_{fw}，铁损耗 P_{Fe}，定子 I^2R 损耗 P_{Cu1s}，转子绕组 I^2R 损耗 P_{Cu2s} 和负载杂散损耗 P_s。电动机的总损耗 $P_T = P_{fw} + P_{Fe} + P_{Cu1s} + P_{Cu2s} + P_s$。由于对各分项损耗的确定有不同的试验方法，例如负载杂散损耗 P_s 就有几种不同的确定方法，由此损耗分析法也有几种不同的试验方法。不同的损耗分析法确定的各项损耗和效率值（对同一电动机）是不同的。因此，采用不同测试方法确定的效率值是不能直接比较的。在确定电动机的效率值时，必须同时规定确定效率的试验方法。

电动机的效率

$$\eta = \left(1 - \frac{P_T}{P_1}\right)100 \qquad (1.8\text{-}10)$$

式中，P_1 为电动机输入功率，W；P_T 为电动机总损耗，W。

采用损耗分析法时，应进行规定条件下的热试验，负载试验和空载试验，以确定电动机的各项损耗。通常用实际负载法进行热试验（额定负载 SF=1.0）和负载试验。若不能按实际负载法进行热试验，可用间接法（见 IEC 61986）进行热试验以确定绕组的工作温度。试验的顺序是：先进行热试验，之后进行负载试验，最后进行空载试验，这样有利于摩擦损耗稳定。若不能按上述顺序进行试验，则负载试验读数时，电机绕组温度与热试验绕组温度之差应不大于 5K。

4.4.1 额定负载热试验

在额定电压、额定频率和额定负载下以实际负载法进行热试验。试验过程中应保持额定负载（或额定电流）恒定，直至达到热平衡为止，即连续定额电机应进行到相隔 30min 两个相继读数之间温升变化不大于 1K 为止。对温升不易稳定的电机，热试验应进行到相隔 60min 两个读数之间温升变化不大于 2K 为止。

有关热试验的其他相关事项参见 GB/T 1032 的 11.7 条。

额定负载热试验结束时，按 3.5.2 的说明和 GB 755 中 7.6.2.3 的规定，测量并确定热端电阻平均值 R_N，绕组工作温度 θ_N 和冷却介质温度 θ_c。

4.4.2 负载试验

在额定电压和额定频率下以实际负载法进行负载试验。试验目的是求取电动机的工作特性。如用剩余损耗法确定电动机的负载杂散损耗，应测量电动机的输出功率 [$P_2 = T \cdot n/9.549$ (W)]。为此，需用转矩仪测量电动机轴输出转矩 T。

读取试验数据之前，定子绕组温度与 4.4.1 测得的 θ_N 之差应不大于 5K。加负载的过程由大到小，依次在额定功率的 150%、125%、100%、75%、50%和 25%的 6 个负载点处读取试验数据。试验应尽快进行，以减少试验过程中温度的变化。

在每负载点测量并记录：频率 f，线电压 U，线电流 I，输入功率 P_1，转速 n，转矩 T_d（如有），端电阻 R_t（或绕组温度 θ_t）和冷却介质温度 θ_c。

在负载试验结束时，测定转矩读数修正值 ΔT，具体方法见 GB/T 1032 中附录 B。

准确测定绕组端电阻 R_t 是比较困难的，但却很重要。因为这与计算试验温度下定子 I^2R 损耗的准确性有关。GB/T 1032中 8.2 条介绍了确定 R_t（或 θ_t）的几种方法，比较有效的方法是在绕组端部分安置测温元件，通过测量绕组温度 θ_t 确定电阻 R_t。

4.4.3 空载试验

在额定频率下，以电动机法进行空载试验，对绕线转子电机，应将其转子绕组短路。在读取试验数据之前，空载损耗应稳定，即相隔 30min 连续测得的空载输入功率读数变化应不大于 3%。

测量并记录至少 8 个电压（包括额定电压）点的读数。在 60%和 125%额定电压之间，大致均匀分布读取 4 点或更多点读数，在 50%额定电压和可达到的最低电压（电流不稳定电压或约 20%额定电压）之间读取 4 个或更多电压点读数。试验自高电压依次降到最低电压。

在每一电压点，测量并记录：f，U_0，I_0，P_0，R_0。

应注意尽可能准确确定试验温度下端电阻算术平均值 R_0，以便能准确计算试验温度下定子绕组 I^2R 损耗 P_{0Cu1}。如不能测取 R_0，可测取绕组温度 θ_0（如埋置检温计等），利用已测得的绕组冷态端电阻 R_1 和测量 R_1 时的绕组温度 θ_1，$R_0 = R_1(K_1 + \theta_0)/(K_1 + \theta_1)$。对于试验时绕组温度变化比较小的较大电机，可在试验结束时测量绕组端电阻 R_0（外推到断电时刻）。

4.4.4 铁损耗和风摩损耗的确定

（1）恒定损耗 P_k

空载输入功率减去试验温度下的定子绕组 I^2R 损耗为恒定损耗 P_k，P_k 是风摩损耗与铁损耗之和，每一电压处的恒定损耗

$$P_k = P_0 - P_{0Cu1} = P_{fw} + P_{Fe} \qquad (1.8\text{-}11)$$

式中，$P_{0Cu1} = 1.5 I_0^2 R_0$，I_0 为空载线电流，R_0 为试验温度下绕组端电阻。

（2）风摩损耗 P_{fw}

50%U_N 及以下低电压范围内的 P_k 对 $(U_0/U_N)^2$ 作曲线，此曲线为直线。延长此直线至零电压处，此直线与纵坐标交点的截距即为风摩损耗 P_{fw}。可用作图法或一元线性回归分析法（参见 GB/T 1032 中附录 C）求取 P_{fw}。认为 P_{fw} 与负载大小无关，即不同负载下的风摩损耗是相同的。

（3）铁损耗 P_{Fe}

对 $U_0 \geqslant 0.6\,U_N$ 各点，$P_{Fe} = P_k - P_{fw}$，作 $P_{Fe} = f(U_0/U_N)$ 曲线。

目前有两种方法确定电机的铁损耗：

1）按 $U_0 = U_N$，即 $U_0/U_N = 1$，在 $P_{Fe} = f(U_0/U_N)$ 曲线上求得 P_{Fe}，按此法求得的 P_{Fe} 为恒定值与负载大小无关。

2）按 U_b/U_N 在 $P_{Fe} = f(U_b/U_N)$ 曲线上求得 P_{Fe}。考虑绕组电阻压降影响

$$U_b = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} I R_t \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I R_t \sin\varphi\right)^2}$$

式中，$\cos\varphi = P_1/(\sqrt{3}UI)$，$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$，$U$，$I$，$P_1$，$R_t$ 为负载试验数据（见 4.4.2）。因 U_b 与负载电流 I 有关，按此法求得的 P_{Fe} 随负载的增加而减少，因此 P_{Fe} 不是恒定值。这比较符合电动机实际工作情况。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4.4.5 定子绕组 I^2R 损耗的确定

(1) 试验温度下定子绕组 I^2R 损耗

$$P_{Cut} = 1.5I^2R_t \tag{1.8-12}$$

式中，I 和 R_t 见负载试验 4.4.2。

(2) 规定温度下定子绕组 I^2R 损耗

$$P_{Cu1s} = 1.5I^2R_N K_{\theta s} \tag{1.8-13}$$

式中，I 为负载试验线电流（4.4.2）；R_N 为热电阻（4.4.1）；$K_{\theta s}=(K_1+\theta_s)/(K_1+\theta_N)$，对于铜导体 $K_1=235$，对于铝导体 $K_1=225$，θ_N 按式（1.8-6）确定，θ_N 按 3.6.2 的规定由 4.4.2 的热试验确定。

4.4.6 转子绕组 I^2R 损耗的确定

(1) 试验温度下转子绕组 I^2R 损耗

$$P_{Cu2} = (P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe})s \tag{1.8-14}$$

式中，s 为负载试验时测取的转差率。

$$s = 1 - \frac{pn}{60f} \tag{1.8-15}$$

式中，P_1，n 和 f 为负载试验数据（见本章 4.4.2）；P_{Cu1} 按式（1.8-12）确定；P_{Fe} 按 4.4.5 (3) 确定；p 为电机的极对数。

(2) 规定温度下转子绕组 I^2R 损耗 P_{Cu2s} 的确定

$$P_{Cu2s} = P_{Cu2}K_{\theta r} \tag{1.8-16}$$

式中，$K_{\theta r}$ 为修正系数，且

$$K_{\theta r} = \frac{K_1 + \theta_s}{K_1 + \theta_t} \tag{1.8-17}$$

式中，P_{Cu2} 按式（1.8-14）确定，θ_s 按式（1.8-6）确定，θ_r 按 4.4.1 节确定，θ_t 为负载试验 4.4.2 节测得的定子绕组温度，K_1 见 4.4.5 节 (2)。

(3) 电刷电损耗（仅对绕线转子）

电刷电损耗属转子 I^2R 损耗，利用假定的每刷电压降，按下式计算电刷电损耗

$$P_b = NU_{br}I \tag{1.8-18}$$

式中，N 为电刷总数；I 为流过每个电刷的电流；U_{br} 为假定的每刷电压降，对于炭、电石墨和石墨电刷：$U_{br}=1.0$V；对于金属-炭电刷，$U_{br}=0.3V_0$

4.4.7 负载杂散损耗的确定

负载杂散损耗是由于：

1) 负载电流在有效铁心和其他金属件（除导体外）中引起的损耗。

2) 因磁通脉振而产生的电流在定子和转子绕组中引起的涡流损耗。

确定负载杂散损耗 P_s 有两类方法：一类是实测法，有剩余损耗法、Eh-star 法和反转法；第二类是推荐值法、根据统计数据给出的推荐值。优先选用实测法。

(1) 剩余损耗法

剩余损耗法是一种实测法，需要进行额定负载热试验（4.4.1 节），负载试验（4.4.2 节）和空载试验（4.4.3 节）。需要测量电动机轴输出功率。

1) 剩余损耗

$$P_L = P_1 - P_2 - (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{fw} + P_{Fe}) \tag{1.8-19}$$

式中，P_1 和 P_2 为负载试验（4.4.3 节）时测取的输入功率和输出功率，P_{Cu1} 按式（1.8-12）确定，P_{Cu2} 按式（1.8-14）确定，P_{fw} 按 4.4.4 节 (2) 确定，P_{Fe} 按 4.4.4 节 (3) 确定。

输出功率 P_2 按下式计算

$$P_2 = Tn/9.549 \tag{1.8-20}$$

式中，$T=T_d+K_d$ 由负载试验（4.4.3）求得，n 为负载试验所测转速。

2) 转矩读数修正值 K_d 的确定。对同轴对中连接的负载电机按 GB/1032 中附录 C 测取 K_d。计算电机性能的转矩 $T=T_d+K_d$，T_d 是负载试验时的转矩读数。

K_d 的物理意义是：转矩仪的读数 T_d 是转矩传感器的输出转矩，因为在电机轴和转矩仪之间有联轴器的风阻损耗及转矩仪与电机侧连接的轴承摩擦损耗在转矩仪的读数中未反映出来，所以 T_d 小于电机输出转矩 T，$T=T_d+K_d$，K_d 表示电机轴输出和转矩仪之间的风摩损耗转矩，所以 $K_d>0$。

确定 K_d 时，关键的读数是 P_{d0}、T_{d0} 和 P_0。在实际计算中，如 s_0 甚小，可以取 $s_0=0$。

3) P_L 的线性回归分析。以 T^2 为横坐标，以 P_L 为纵坐标作图，这两组变量呈线性关系，表明这两组变量正向线性相关（见图 1.8-7）。相关系数 r 表明这些测试点数据与直线的吻合程度。

线性回归方程

$$P_L = AT^2 + B \tag{1.8-21}$$

式中，A 为斜率；B 为截距。A、B 和 r 可按 GB/T 1032 中附录 C 求取。

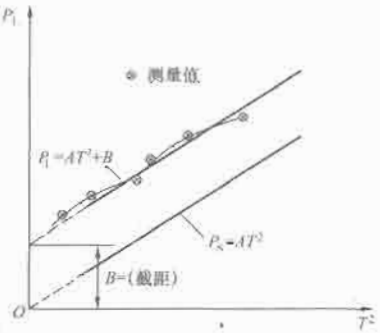


图 1.8-7 负载杂散损耗修匀（示例）

负载杂散损耗 $P_s=AT^2$。根据各预定负载点的转矩 T，求得各点杂散损耗。

GB/T 1032—2005 要求，相关系数 $r\geqslant 0.95$ 或 $r\geqslant 0.90$。$r\geqslant 0.95$ 可符合 IEC 61972：2002 和 IEC 60034-2 Ed.4 的要求。$r\geqslant 0.90$，可符合 IEEE112 标准的要求。若 r 不符合要求，则应按标准规定执行。

实际试验中，截距 B 可能是负值或正值，B 的数值可能较小或较大，B 越小越好。

4) 剩余损耗法的准确性。剩余损耗法是被广泛采用的方法，也是公认比较准确的方法。需要准确测定负载试验时的输入功率 P_1 和输出功率 P_2，准确确定 P_{Cu1} 式（1.8-14）和 P_{Cu2} 式（1.8-14），为此应准确测定试验温度下的定子绕组端电阻 R_t 和转差率 s，准确测定 P_{fw} 和 P_{Fe}。

因为负载杂散损耗 $P_s=AT^2$，所以准确测量转矩 T 是很重要的。为此要求转矩测量仪的准确度等级应不低于 0.2 级，正确选用合适规格的转矩测量仪。

(2) Eh-star 法（IEC-60034-2 Ed.4）

Eh-Star 法是 IEC 60034-2 修订稿 2/1367 CDV 中提出的方法，现已被列入 IEC 60034-2Ed.4 的标准中。Eh-star 法与剩余损耗比较准确性二者相近，但试验比较简单，不需要测量转矩，这是新纳入的方法。

1) 试验程序。本试验要求被试电动机在不平衡电压下空载运转。试验线路如图 1.8-8 所示。试验时，被试电机绕组为 Y 联结（如为△联结，也改为 Y 联结）。中性点必须悬空，以免产生零序电流。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

电动机的第三相（W）经电阻器 R_{ch} 接到电源上。R_{ch} 的典型数值：

对按Y联结设计的电动机 $R'_{ch}=0.2U_N/(\sqrt{3}I_N)$

对按△联结设计的电动机 $R'_{ch}=0.2\sqrt{3}U_N/I_N$

试验时，调节电阻 R_{ch} 使正序电流 I_{ps} 保持小于负序电流 I_{ns} 的30%并转速保持在接近额定转速的范围内。建议开始试验时，实际电阻 R_{ch} 与计算值 R'_{ch} 相差不大于20%。

试验电流：

对按Y联结设计的电动机：$I_t=\sqrt{I_N^2-I_0^2}$

对按△联结设计的电动机：$I_t=\sqrt{I_N^2-I_0^2}/\sqrt{3}$

试验电压：

对按Y联结设计的电动机：$U_t=U_N$

对按△联结设计的电动机：$U_t=\sqrt{3}U_N$

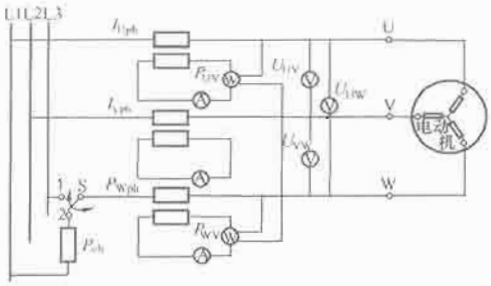


图 1.8-8 Eh-star 法试验线路

在测取试验读数之前，电动机的空载损耗已经稳定。试验之前和试验以后测量V和W相之间的端电阻 R_{11VW}。

为了避免三相不平衡发热，试验应从冷态开始并尽快做完试验。

对大型电动机，应在无电阻器 R_{ch}（图中开关S在1位置）降低电压25%～45%U_N 起动，电动机起动完成之后，开关S置于位置2。小型电动机可带已接好的电阻器 R_{ch} 起动，这样就不需要开关。

改变电源电压做6点试验。在实测的150%和75%V相额定电流（I_V）之间大致均匀分布6点。试验自最大电流开始，此后依次降低到最小电流。

100%及较小试验电流试验点的端电阻 R_{11VW} 用最小读数之后（试验结束时）测取的电阻外推（到断电时刻）法确定。用试验前电阻和试验后的电阻，根据与电流线性关系确定大于100%试验电流的电阻。

在各试验点记录：

$$I_U;I_V;I_W;U_{UV};U_{VU};U_{WU};P_{UV};P_{WV};n$$

需注意如下两点：

①端电阻 R_{11VW} 可用安置在绕组上测温元件测得的绕组温度确定之。根据各试验点待求电阻和已测温度与试验前测得的电阻和温度之间的关系，可确定各试验点电阻。

②不可使用内部已是星形联结三相功率表。在本试验中，有意使电机接线端的外电压不对称。因此必须保证星点既不能接地也不能再有其他新的星点形成。必须用图1.8-8所示线路。

为了得到准确的试验结果，在全部试验中，实测转差率应不大于2倍额定转差率，即 $n>n_s-2(n_s-n)$ 如不符合此要求，则增大 R_{ch} 阻值重复试验。如果在低于100%额定相电流时电动机运转仍不稳定，删去这些点的试验数据。

2）Eh-star 法的计算程序。见 IEC 60034-2Ed.4 的附录B。

（3）反转法

反转法属实测法，其准确度不如剩余损耗法和Eh-star法，即反转法的相对不确定大（见表1.8-3b）。反转法包括测试基频杂散损耗和高频杂散损耗。

1）基频杂散损耗的测量。电机抽去转子，可能感应电流的端盖及其他结构件应就位。定子绕组上施以额定频率的对称低电压；试验从大电流值开始，逐步降低，在1.1～0.5倍额定电流范围内测取6点读数。每点应同时读取 P_1，I_1 和 $\theta_t(R_t)$。输入功率 P_1 减去定子绕组在试验温度下的 I^2R 损耗即为基频杂散损耗

$$P_{sf}=P_1-1.5I_1^2R_t \tag{1.8-22}$$

式中，$R_t=R_1\dfrac{K_1+\theta_t}{K_1+\theta_1}$；$R_1$，$\theta_1$ 为冷态端电阻平均值和冷态绕组温度；θ_t 为试验时测得的绕组温度；I_1 为定子线电流；P_1 为输入功率。

2）高频杂散损耗的测量（测转矩反转法）。高频杂散损耗测量应在被试电机接近额定负载热状态下进行。

采用转矩测量仪时，转矩传感器标称转矩应不大于被试电机额定转矩的15%。

驱动被试电动机转子，使之与定子旋转磁场相反方向达到同步转速（如试验电源不是额定频率，应为对应于实际频率的同步转速）。待机械损耗稳定后，在被试电机的定子绕组上施以额定频率三相对称的低电压。试验从大电流值开始，逐步降低。在1.1～0.5倍额定电流范围内，测取6点读数，每点应同时测取 P_1、I_1、T_d 和 θ_t（或端电阻 R_t）。

断开被试电机的电源，机组仍应保持同步转速运转，测取 T_{d0}。

如为绕线转子电机，转子绕组应短接。

计算用高频杂散损耗

$$P'_{sh}=P_d-P_{d0}-(P_1-1.5I_1^2R_t) \tag{1.8-23}$$

式中，R_t 为试验温度下的定子绕组端电阻，Ω，计算方法参见4.4.2节；P_d、P_{d0} 为被试电机轴端输入功率。

$$P_d=\frac{T_dn_s}{9.549} \tag{1.8-24}$$

$$P_{d0}=\frac{T_{d0}n_s}{9.549} \tag{1.8-25}$$

高频杂散损耗

$$P_{sh}=P'_{sh}+P_{sf} \tag{1.8-26}$$

分别绘制 P_{sf} 和 P'_{sh} 对 I_1 的关系曲线（见图1.8-9）。因为空载电流引起的杂散损耗已包括在铁损耗中，故被试电机的杂散损耗应按转子电流的近似值 I_2 求取。

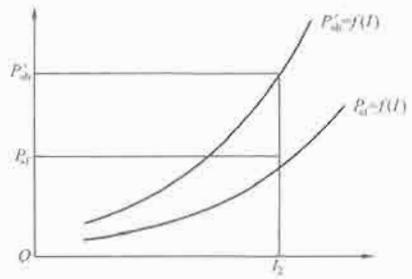


图 1.8-9 杂散损耗求取曲线

转子电流

$$I_2=\sqrt{I_1^2-I_0^2} \tag{1.8-27}$$

式中，I_0 为被试电机在额定电压时的空载电流，A。

从图1.8-9中查得对应于 I_2 的 P_{sf} 和 P'_{sh} 的数值，被试电机的杂散损耗

$$P_s=P_{sf}+P_{sh}=P'_{sh}+2P_{sf}$$

（4）推荐值法

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

如果不能用试验方法测定 P_s 时，可采用下述方法给出的推荐值：

额定负载杂散损耗

$$P_s = P_1 \times 0.025 \quad \text{对 } P_2 \leqslant 1\text{kW}$$

$$P_s = P_1\left[0.025 - 0.005\lg\left(\frac{P_2}{1\text{kW}}\right)\right]$$

$$\text{对 } 1\text{kW} < P_2 < 10000\text{kW}$$

$$P_s = P_1 \times 0.005 \quad \text{对 } P_2 \geqslant 10000\text{kW}$$

非额定负载杂散损耗按与 $(I_1^2 - I_0^2)/(I_N^2 - I_0^2)$ 成比例确定。

4.4.8 总损耗和效率的计算

(1) 总损耗

$$P_T = P_{Cu1s} + P_{Cu2s} + P_{Fe} + P_{fw} + P_s \quad (1.8\text{-}28)$$

式中，P_{Cu1s} 按式(1.8-13)确定；P_{Cu2s} 按式(1.8-16)确定；P_{Fe} 按4.4.4(3)确定；P_{fw} 按4.4.4(2)确定；P_s 按4.4.7确定。

(2) 输出功率

$$P_2 = P_1 - P_T \quad (1.8\text{-}29)$$

(3) 效率

$$\eta = (1 - P_T/P_1) \quad (1.8\text{-}30)$$

式中，P_1 为负载试验（4.4.2）测试的输入功率；P_T 按式(1.8-28)计算。

4.5 降低电压负载法

4.5.1 试验程序

降低电压负载试验法属于损耗分析法，适用于不能以实际负载进行满载试验的笼型感应电动机。通过空载试验按4.4.4节(2)确定风摩损耗 P_{fw}、按4.4.4节(3)确定铁损耗 P_{Fe}。负载杂散损耗 P_s 可按4.4.7节规定的一种方法确定。通过降低电压负载试验测定电动机的输入功率 P_1、线电流 I 和转差率 s，确定电动机的定子 I^2R 损耗和转子 I^2R 损耗。

被试电机在额定频率 f_N、1/2额定电压和1/2额定电流下运行到接近热稳定状态。保持 f_N 和1/2额定电压不变，在0.6倍额定电流至空载电流之间，均匀分布测取6点读数。每点应测取：三相线电压 U_r、三相线电流 I_{1r}、输入功率 P_{1r}、转速 n、绕组温度 θ_t 及环温 θ_c。测试完毕，立即断电停机测量定子绕组端电阻 R，测量5～7点，用外推法确定断电瞬时的电阻 R_1。

4.5.2 损耗和效率计算

额定功率时的效率按下述方法确定：

(1) 规定温度下的转差率

$$s_s = sK_{\theta r} \quad (1.8\text{-}31)$$

式中，s 由4.5.1试验值按式(1.8-15)计算，$K_{\theta r}$ 按式(1.8-17)计算。

(2) 作 $P_{1r} = f(I_{1r})$ 和 $s_s = f(I_{1r})$ 曲线图（见图1.8-10）

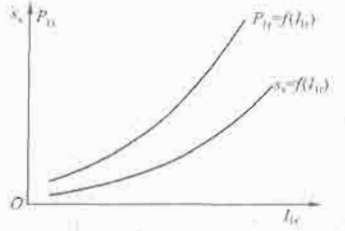


图 1.8-10 输入功率、转差率与输入电流关系曲线

额定功率时的效率按下述方法求取：

1) 假定定子电流为 I_{1r} 为1/2额定电流，从图1.8-10中查得对应的输入功率 P_{1r}，则额定电压时的输入功率 P_1 按下式求取

$$P_1 = P_{1r}\left(\frac{U_N}{U_r}\right)^2 \quad (1.8\text{-}32)$$

2) 额定电压下输入功率为 P_1 时的定子电流 I_1，如图1.8-11所示，按下式求取

$$I_1 = \sqrt{(I'_{1r})^2 + \Delta I_0^2 - 2I'_{1r}\Delta I_0\cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_r\right)} \quad (1.8\text{-}33)$$

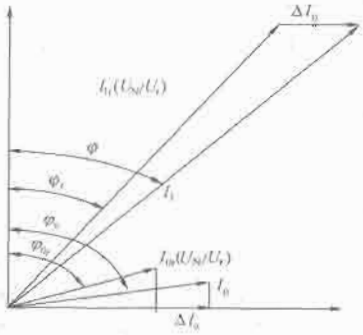


图 1.8-11 求取额定电压时负载电流 I_1 的向量图

式中，U_r 为降低电压负载试验实测线电压平均值。

$$I'_{1r} = I_{1r}\frac{U_N}{U_r}$$

$$\varphi_r = \arccos\frac{P_{1r}}{\sqrt{3}U_r I_{1r}}$$

$$\Delta I_0 = I_0\sin\varphi_0 - I_{0r}\left(\frac{U_N}{U_r}\right)\sin\varphi_{0r}$$

$$\varphi_0 = \arccos\frac{P_0}{\sqrt{3}U_N I_0}$$

$$\varphi_{0r} = \arccos\frac{P_{0r}}{\sqrt{3}U_r I_{0r}}$$

式中，I_0、P_0 分别为电动机在 $U_0 = U_N$ 时的空载电流和空载损耗；I_{0r}、P_{0r} 分别为电动机在 $U_0 = U_r$ 时的空载电流和空载损耗。

3) 额定功率时的转差率 s_s，根据定子电流 I_{1r}，从图1.8-10中求得。

4) 各项损耗 P_{fw}、P_{Fe}、P_{Cu1s}、P_{Cu2s} 和 P_s 按4.4.3～4.4.7节确定。

5) 电动机的输出功率 P_2 按式(1.8-29)计算；如求得的输出功率 P_2 与额定功率 P_N 之差大于额定功率的0.1%时，则应重新假定定子的电流 I_{1r}，重复1)～5)项的计算。

6) 电动机的效率按式(1.8-30)求取。

4.6 等效电路法

若不进行负载试验，可依据图1.8-12所示等效电路求取电机的工作特性（效率、功率因数、转矩等），等效电路中的参数是用空载试验和阻抗试验得出的试验数据求得的，能否精确地预测正常运行范围内的电机特性，首先取决于电阻 R_2 与低频电流实际转子电阻的接近程度；其次取决于电抗 X_2 与低频电流实际转子漏抗的接近程度。因此，在确定

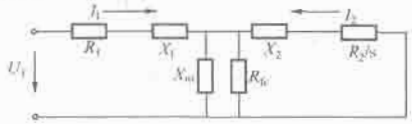


图 1.8-12 T形等效电路

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

低频转子特性的试验中有必要采取极为仔细的方法。

4.6.1 试验程序

（1）空载试验

试验方法见4.4.3节，通过空载试验，确定额定电压下的下列数值：相电流 I_0，输入功率 P_0，铁损耗 P_{Fe}，风摩损耗 P_{fw} 和试验结束时定子绕组相电阻 R_{1c}。

（2）低频阻抗试验

低频阻抗试验，频率不大于25%额定频率。试验电源可以是机组也可以是静止变频器，要求其实际输出电流为正弦波形。

笼型电机转子是对称的导电排绕组，无论转子相对于定子在任何位置，电动机的阻抗是相同的。对绕线转子电动机，应在转子绕组短路后进行试验。绕线转子电动机的阻抗大小与其定子、转子之间相对位置有关。因此，在读数之前，慢慢地转动转子观察定子电流的变化，记录电流最大和最小时的转子位置。在电流为平均值时的转子位置处，进行堵转试验、如此可测得阻抗的平均值。

转子应堵住不转动，测取不同电压时的输入功率和电流，在接近额定电流时应特别注意读数的准确性。应同时读取各相电压、电流、输入功率、频率、绕组电阻、绕组温度和环温。试验期间，定子绕组温度上升应不超过5℃，以电压为横坐标，电流和输入功率为纵坐标绘制曲线，此曲线通常是直线，在高电压处稍许上翘，若转子为闭口槽，在较低电压时就会明显上翘。从曲线上，根据与电流值（通常为额定电流）对应的输入功率和对应的电压确定总电抗和转子电阻。

低频阻抗试验记录并确定下列数值：试验频率 f_k，相电流 I_{1k}，相电压 U_{1k}，输入功率 P_{1k} 及试验结束时定子绕组相电阻 R_{1k}。

4.6.2 等效电路参数的计算

等效电路中的电压、电流、电阻和电抗等为相电压、相电流、相电阻和每相电抗，功率为三相功率值。

（1）定子电抗和转子电抗的设计值

定子电抗 X_1 和转子电抗 X_2 的设计值按下式求取

$$[X_1]=X_1^*\left(\frac{3U_N^2}{P_N}\right) \tag{1.8-34}$$

$$[X_2]=X_2^*\left(\frac{3U_N^2}{P_N}\right) \tag{1.8-35}$$

式中，X_1^*、X_2^* 为定子电抗和转子电抗的标么值（设计值）。

定子电抗和转子电抗的比值

$$\left[\frac{X_1}{X_2}\right]=\frac{[X_1]}{[X_2]} \tag{1.8-36}$$

励磁电抗的估算值

$$[X_m]\approx\frac{U_N}{I_0}-[X_1] \tag{1.8-37}$$

并求出

$$\left[\frac{X_1}{X_m}\right]=\frac{[X_1]}{[X_m]} \tag{1.8-38}$$

（2）等效电路参数的求取

等效电路（见图1.8-12）中所有转子参数均为折算至定子侧的值。

1）X_m、X_1 近似值的求取。

假定：$X_1=[X_1]$；$\frac{X_1}{X_m}=\left[\frac{X_1}{X_m}\right]$；$\frac{X_1}{X_2}=\left[\frac{X_1}{X_2}\right]$

按下式求取 X_m、X_{1k} 和 X_1

$$X_m=\frac{3U_N^2}{Q_0-3I_0^2X_1}\left[\frac{1}{1+\frac{X_1}{X_m}}\right]^2 \tag{1.8-39}$$

式中，Q_0 为空载时的无功功率、var，按下式求取

$$Q_0=\sqrt{(3U_NI_0)^2-P_0^2}$$

$$X_{1k}=\frac{Q_k}{3I_{1k}^2\left(1+\frac{X_1}{X_2}+\frac{X_1}{X_m}\right)}\left(\frac{X_1}{X_2}+\frac{X_1}{X_m}\right) \tag{1.8-40}$$

式中，Q_k 为堵转时的无功功率，var，按下式求取

$$Q_k=\sqrt{(3U_{1k}I_{1k})^2-P_{1k}^2} \tag{1.8-41}$$

$$X_k=\frac{f_N}{f_k}X_{1k} \tag{1.8-42}$$

2）用迭代法精确求取 X_m、X_1 的值。利用上述求得的 X_m、X_1 的近似值，重新算出 X_1/X_m，仍取 $X_1/X_2=[X_1/X_2]$，代入式（1.8-39）、式（1.8-40）、式（1.8-42），再求出 X_m、X_{1k} 和 X_1，不断重复上述过程，直至相邻两次求得 X_m 和 X_1 相差小于0.1%为止。

3）转子电抗和励磁电纳的求取

$$X_2=\frac{X_1}{\left[\frac{X_1}{X_2}\right]} \tag{1.8-43}$$

$$B_m=\frac{1}{X_m} \tag{1.8-44}$$

4）铁心电导的求取

$$G_{Fe}=\frac{P_{Fe}}{3U_N^2}\left(1+\frac{X_1}{X_m}\right)^2 \tag{1.8-45}$$

5）转子电阻的求取

$$R_2=\left(\frac{P_{1k}}{3I_{1k}^2}-R_{1k}\right)\left(1+\frac{X_2}{X_m}\right)^2-\left(\frac{X_2}{X_1}\right)^2(X_{1k}^2G_{Fe}) \tag{1.8-46}$$

对绕线转子电机，用下式求取转子电阻 R_2

$$R_2=R'_{2ref}K_U^2 \tag{1.8-47}$$

式中，R'_{2ref} 为换算至规定温度时的转子电阻；K_u 为变压比（转子绕组开路时，定、转子绕组电压比）。

4.6.3 工作特性的求取

1）工作特性的计算程序见GB/T 1032中15.5F格式。铁损耗 P_{Fe} 和风摩损耗 P_{fw} 由空载试验确定，负载杂散损耗 P_s 按4.4.7节确定。

2）额定功率时效率的求取。由第一次假定的转差率 $s_{(1)}$ 算出输出功率 $P_{2(1)}$，如果不等于电动机的额定功率 P_N，则需重新假定一个转差率 $s_{(2)}$，再按上述步骤进行计算，直至算出输出功率 P_2 与额定功率 P_N 之差小于额定功率的0.1%为止。$s_{(2)}$ 可按下式估算

$$s_{(2)}=s_{(1)}\left[1+\frac{P_N-P_{2(1)}}{P_N}\right] \tag{1.8-48}$$

也可将多次计算所得的数据，绘制转差率 s、定子电流 I_1、输入功率 P_1、效率 η、功率因数 $\cos\varphi$ 与输出功率 P_2 的特性曲线，从曲线上查取额定功率 P_N 所对应的性能数据。

5 三相同步电机确定损耗和效率的试验方法

5.1 输入—输出法

测量被试电机的转矩 T（测功机、转矩仪、校准过直流电机）和转速 n，测得机械功率 P_{mech}，用电量仪表测得被试电机的电功率 P_{el}。

$$\eta=\frac{P_2}{P_1+P_{1E}} \tag{1.8-49}$$

式中，P_1 为输入功率；P_2 为输出功率；P_{1E} 为被试电机的他励励磁功率。

对于电动机：$P_1=P_{el}$，$P_2=P_{mech}$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

对于发电机：$P_1=P_{mech}$，$P_2=P_{el}$

$$P_{mech}=Tn/9.549$$

5.2 总损耗测定法

5.2.1 双电源对拖回馈法（见图 1.8-13）

把两台相同的电机机械耦合，一台作电动机运行，另一台作发电机运行。用电气仪表测量电动机的输入功率和发电机的输出功率，当两台电机的运行工况基本相同时，可假定损耗是平均分担的，则电动机的输出功率为输入功率与总损耗之半的差，而发电机的输入功率为输出功率与总损耗之半的和。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终了时所到的温度下进行。

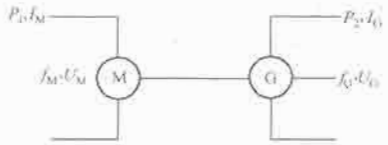


图 1.8-13 同步电机双馈对拖原理图

$$I_M=I_G,\quad f_M=f_G$$

$$\eta=1-\frac{P_T}{\frac{P_1+P_2}{2}+P_{1E}} \tag{1.8-50}$$

式中

$$P_T=\frac{1}{2}(P_1-P_2)+P_{1E}$$

$$P_{1E}=\frac{1}{2}(P_{1EM}+P_{1EG})$$

5.2.2 单电源对拖回馈法（见图 1.8-14）

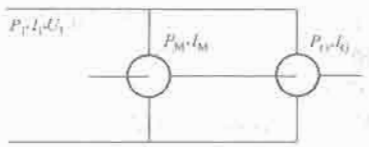


图 1.8-14 同步电机单馈对拖原理图

把两台相同的电机机械和电气耦合在一起，一台作电动机，另一台作发电机运行，这两台电机的损耗由它们所连接的电网来提供。

当两台电机运行工况基本相同时，可假定损耗是平均分担的。

由于两台电机间的功率转移的大小随其功角的大小而不同，故两台电机机械耦合时应有一个正确的功角关系。

$$\eta=1-\frac{P_T}{P_M+P_{1E}} \tag{1.8-51}$$

式中，P_M 为电动机输入功率（不包括励磁功率）；P_T 为总损耗，$P_T=\frac{1}{2}P_1+P_{1E}$，$P_1$ 为试验回路输入功率；P_{1E}为他励励磁功率，$P_{1E}=\frac{1}{2}(P_{1EM}+P_{1EG})$。

5.2.3 零功率因数法

被试电机在额定电压、额定转速和过励下作空载电动机运行，功率因数在零左右，调节励磁电流使电枢绕组电流达到额定值。其总损耗即等于试验时输入的功率，其中励磁损耗应按实际励磁电流损耗与额定负载时励磁电流损耗之差进行修正。

调节电枢电压，以使在该电压下的铁损耗与空载额定电压时的铁损耗相等。如果在额定电枢电压下试验不会比满载时铁损耗增加很多，通常在额定电压下试验。原则上无功功率应该是正的（过励）。如由于励磁电压不够而做不到时，试验也可在吸收无功率（欠励）工况下进行。

试验应在接近额定负载热平衡结束时进行，试验时应测量并记录 U，f，I，$P_{1.zpf}$（零功率因数试验输入功率）。

电机的总损耗 $P_T=P_{1.zpf}+P_{1E}$

式中，$P_{1.zpf}$为零功率因数试验输入功率；P_{1E}为他励励磁功率。

电机效率：

对于发电机

$$\eta=\left(1-\frac{P_T}{P_2+P_T}\right) \tag{1.8-52a}$$

对于电动机

$$\eta=\left(1-\frac{P_T}{P_1+P_{1E}}\right) \tag{1.8-52b}$$

式中，P_1 为电动机的输入功率；P_2 为电动机输出功率。

5.3 损耗分析法

通常同步电机采用损耗分析法确定效率

$$\eta=\frac{P_1+P_{1E}-P_T}{P_1+P_{1E}}\text{（对于电动机）} \tag{1.8-53a}$$

$$\eta=\frac{P_2}{P_2+P_T}\text{（对于发电机）} \tag{1.8-53b}$$

式中，P_1 为电动机输入功率；P_2 为发电机输出功率；P_{1E}为他励励磁功率；P_T 为按 5.3.1 节确定的总损耗。

总损耗 P_T 的确定

$$P_T=P_{Fe}+P_{fw}+P_{Cus}+P_e+P_s$$

式中，P_{Fe}为铁损耗，按 5.3.1 节确定；P_{fw}为风摩损耗，按 5.3.1 节确定；P_{Cus}为电枢绕组 I^2R 损耗，按 5.3.2 节确定；P_e 为励磁回路损耗，按 5.3.3 节确定；P_s 为负载杂散损耗，按 5.3.4 节确定。

5.3.1 铁损耗和风摩损耗的确定

（1）空载发电机法

被试电机的励磁电流由独立的直流电源供给，由原动机拖动作为空载发电机运行。发电机的输入功率（机械功率）由测功机或转矩仪测量。试验时，被试电机应为额定转速。待摩擦损耗稳定后，调节发电机的励磁电流，在发电机的不同电压下读取转矩仪或测功机的输出转矩 T 和转速 n。转矩仪所测的输出功率，就是发电机的输入功率 P_{in}。P_{in}即为被试电机的在对应电压下的铁损耗 P_{Fe} 和风摩损耗 P_{fw} 之和 P_k。

发电机的空载电压 U_0 的范围为（0.2～1.25）U_N，其中（0.6～1.25）U_N 范围内均匀测取 4～5 点，在（0.5～0.2）U_N 范围内均匀测取 4～5 点。

按 4.4.4 节（2）所述的方法确定 P_{fw}；按 4.4.4 节（3）所述的方法确定铁损耗 P_{Fe}。

（2）空载电动机法

被试电机在额定频率下以空载电动机的方式运行。外施电压应为实际可调的对称电压，励磁电流由独立的直流电源供给。调节励磁电流使电枢电流为最小。待摩擦损耗稳定后，在空载电压 $U_0=(0.2\sim1.25)U_N$ 范围内，在自高至低的不同电压下测取空载输入功率 P_0。电枢线电流 I_0 和试验温度下的电枢绕组端电阻 R_0（或绕组温度 θ_0）。当不能在试验过程中测量 R_0 或 θ_0 时，可紧接在试验结束后立即测取 R_0，并修正到断电时刻。

电机的恒定损耗

$$P_k=P_0-1.5I_0^2R_0 \tag{1.8-54}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式中，P_0 为空载输入功率；I_0 为电枢线电流；R_0 为电枢绕组端电阻。

按4.4.4节（2）和4.4.4节（3）所述的方法确定 P_{fw} 和 P_{Fe}。取 $U_0=U_N$ 时的铁损耗作为电机满载运行的铁损耗。

5.3.2 规定温度下定子绕组 I^2R 损耗 P_{Cus} 的确定

$$P_{Cus}=1.5I_a^2R_{as} \tag{1.8-55}$$

$$R_{as}=R_NK_{\theta s} \tag{1.8-56}$$

式中，I_a 为负载试验测取的电枢线电流；R_{as} 为规定温度下电枢绕组端电阻；R_N 为热试验测得的电枢绕组热电阻；$K_{\theta s}$ 为绕组工作温度 θ_N 换算为环温为25℃时的换算系数；R_N、θ_N 和 $K_{\theta s}$ 的确定方法见4.4.5节（2）。

5.3.3 励磁回路损耗 P_e 的确定

励磁回路损耗包括：励磁绕组 I^2R 损耗；变阻器损耗；电刷电损耗；励磁机损耗；电机自带的励磁装置损耗；辅助绕组的 I^2R 损耗。

1）规定温度下励磁绕组 I^2R 损耗

$$P_{fs}=I_f^2R_{fs} \tag{1.8-57}$$

式中，I_f 为励磁电流；R_{fs} 为换算至规定温度 θ_s（见3.6.3）时励磁绕组电阻。

2）变阻器损耗

$$P_R=I_{fR}U_R \tag{1.8-58}$$

式中，I_{fR} 为流经变阻器的电流；U_R 为流经 I_{fR} 之变阻器压降。

3）其余各项损耗按GB/T 1029之5.4.3.3（电刷电损耗）；5.4.3.4（励磁机损耗）；5.4.3.5（自带励磁装置损耗）和5.4.3.6（辅助绕组 I^2R 损耗）确定。

5.3.4 负载杂散损耗 P_s 的确定

（1）发电机短路法

被试电机电枢绕组短路，原动机、转矩仪和被试电机应同轴连接。被试电机他励，原动机将被试电机驱动到额定转速，调节励磁电流，使电枢短路电流等于额定电流。应测量并记录：被试电机的输入转矩 T，转速 n，电枢线电流 I_a 和电枢绕组端电阻 R_a（断电停机外推到断电瞬时的电阻值）。

被试电机的输入功率减去风摩损耗，减去电枢绕组 I^2R 损耗，即得负载杂散损耗

$$P_s=\frac{Tn}{9.549}-P_{fw}-1.5I_a^2R_a \tag{1.8-59}$$

若被试电机为无刷励磁方式，还应减去由原动机供给的励磁绕组 I^2R 损耗和励磁机损耗，即

$$P_s=\frac{Tn}{9.549}-P_{fw}-1.5I_a^2R_a-P_f-P_{Ed} \tag{1.8-60}$$

式中，T 为被试电机的输入转矩；n 为被试电机的转速；P_{fw} 为被试电机的风摩损耗；I_a 为电枢线电流；R_a 为电枢绕组端电阻；P_f 为试验温度下被试电机励磁绕组 I^2R 损耗；P_{Ed} 为励磁机损耗。

非额定电流点的负载杂散损耗与 $(I/I_N)^2$ 成比例。

（2）空载电动机过欠励法

被试电机以空载电动机方式运行，由独立电源励磁，电枢绕组外施实际对称的额定频率的额定电压。待电机的风摩损耗稳定后，即可进行本项试验。

被试电机分别在过励和欠励方式下调节励磁电流使电枢电流为额定值，读取电枢电压、电枢电流、输入功率、励磁电流、转速和试验温度下电枢绕组端电阻（或断电停机后测取电阻，取外推到断电停机瞬间的电阻值作为计算电枢绕组 I^2R 的电阻）。

被试电机的输入功率减去铁损耗、风摩损耗和电枢绕组 I^2R 损耗，即得被试电机分别在过、欠励运行时的杂散损耗，取其平均值作为被试电机的杂散损耗。若在欠励方式下不能将电枢电流调到额定值，允许取过励方式下的杂散损耗作为被试电机的负载杂散损耗。

应采用低功率因数功率表测量输入功率。

（3）空载电动机短路法（IEC 60034-2Ed.4 6.4.5.6.2和9.2.2.7.2）

被试电机为他励在额定频率下以空载电动机方式运行，端电压最好约为额定电压的1/3或能稳定运行的更低电压。调节励磁电流，使电枢电流在额定电流的125%和25%之间变化，其间取6个电流点（大致均匀分布），其中应包括1个或2个最小电流点。试验自大电流开始，以使电机的温度均匀。

有时被试电机的电枢电流不能超过额定电流、如需最大试验电流为125%额定电流，则应征得制造商的同意。

在各测试点读取：输入功率 P_1，线电流 I_1，端电压 U 和试验温度下电枢绕组端电阻 R_a。

各测试点的负载杂散损耗等于输入功率 P_1 减去铁损耗、风摩损耗和试验温度下电枢绕组 I^2R 损耗。

6 直流电机确定损耗和效率的试验方法

6.1 输入—输出法

测量被试电机的转矩 T 和转速 n，机械功率 $P_{mech}=T\cdot n/9.549$。用电量仪表测量被试电机的电功率 P_{el}（见图1.8-4）

$$\eta=\frac{P_2}{P_1+P_{1E}} \tag{1.8-61}$$

式中，P_1 为输入功率；P_2 为输出功率；P_{1E} 为他励励磁功率。

对于电动机 $P_1=P_{el}$，$P_2=P_{mech}$

对于发电机 $P_1=P_{mech}$，$P_2=P_{el}$

6.2 总损耗测定法——单电源对拖回馈法

两台完全相同的电机机械上耦合在一起，发电机G与升压发电机B串联后和电动机M接到同一电源（见图1.8-15），电动机M和G为他励。

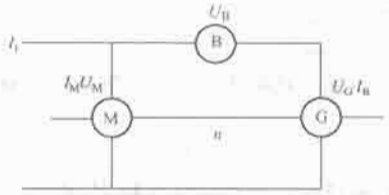


图1.8-15 直流电机单电源对拖回馈试验线路图

电源对电动机M施加额定电压并给电动机加负载，发电机G由升压机B调整到额定电压并使发电机达到要求的负载。电源主要供给空载损耗，升压机供给负载损耗。

如无升压机可用，应同时调节两台电机公共电压，使这两台电机电流的平均值为额定电流。

在每一测试电流，测量并记录：U_M、I_1、P_M、U_G、U_B、I_B、n 和 θ_c。U_M、I_1 为电源电压和电流，P_M 为电动机M吸收的功率，U_B、I_B 为升压发电机B的电压和电流，n 为试验电机转速，θ_c 为试验时环温。

两台完全相同电机运行在基本相同的额定工况下，假定

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

每台电机的损耗为总损耗的一半，则电机的效率为

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M + P_{1E}} \tag{1.8-62}$$

$$P_T = \frac{1}{2}(U_M I_1 + U_B I_B) + P_{1E} \tag{1.8-63}$$

$$P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1EM} + P_{1EG}) \tag{1.8-64}$$

式中，P_M为电动机M接线端子处的吸收功率（励磁功率除外）；P_T为一台电机总损耗；P_{1E}为他励电源供给的励磁功率（对有升压机的电机，见图1.8-15）。

6.3 损耗分析法

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \tag{1.8-65}$$

式中，P_1为输入功率（他励电源供给的励磁功率除外）；P_2为输出功率；P_{1E}为他励电源供给的励磁功率；P_T为总损耗。

6.3.1 总损耗

$$P_T = P_k + P_a + P_b + P_s + P_e \tag{1.8-66}$$

式中，P_k为恒定损耗；P_a为电枢回路I^2R损耗；P_b为电刷电损耗；P_s为负载杂散损耗；$P_e = P_f + P_{Ed}$，P_f为励磁绕组损耗；P_{Ed}为励磁机损耗。

6.3.2 恒定损耗

通常用空载电动机法测定恒定损耗P_k，可参照感应电动机确定P_k的方法［见4.4.4（1）］。应根据内电压U（感应电动势）确定铁损耗：

对于电动机 $U = U_N - (IR_a) - 2U_{br}$

对于发电机 $U = U_N + (IR_a) + 2U_{br}$

式中，U_N为额定电压；$2U_{br}$为电刷电压降；I为负载电流；R为在额定负载温度下电枢回路绕组电阻。

6.3.3 电枢回路绕组I^2R损耗

$$P_a = I^2R \tag{1.8-67}$$

式中，I为电枢回路负载电流；R为在规定温度下电枢回路绕组电阻。

6.3.4 电刷电损耗

$$P_b = 2U_{br}I \tag{1.8-68}$$

式中，I电枢回路电流；U_{br}为每一电刷电压降，与电刷的材料有关。对于炭、电石墨和石墨电刷，$U_{br} = 1.0V$；对于金属-电刷，$U_{br} = 0.3V$。

6.3.5 励磁回路损耗

若做负载试验，励磁绕组损耗根据所测励磁电压U_e和电流I_e计算

$$P_f = U_e I_e$$

若不做负载试验，励磁绕组损耗P_e根据$I_e^2R_f$计算值确定。R_f为并励或他励励磁绕组电阻并修正到基准温度，I_e为励磁电流，按下述的一种方法取值：

1）对并励或他励发电机（不论有无换向极），取电机的空载电压等于额定电压加电枢回路在额定电流时的电阻压降［包括电枢绕组、电刷，再加换向绕组（如有）］之和所对应的励磁电流的110%。

2）对带有补偿绕组的并励或他励发电机，取电机的空载电压等于额定电压加电枢回路在额定电流时的电阻压降（包括电枢绕组、电刷、换向绕组和补偿绕组）之和所对应的励磁电流。

3）对平复励发电机，取空载额定电压时的励磁电流。

4）对过复励、欠复励以及特种型式发电机，由制造厂与用户协商决定。

5）对并励电动机，取额定电压时的空载励磁电流。

励磁机损耗P_{Ed}的确定（仅适用于电机主轴拖动并专为本机励磁之用的励磁机）。

励磁机从电机轴上吸收的功率减去其线端输出的有效功率即为励磁机损耗。若励磁机由独立的电源励磁，则损耗中还要包括此励磁机的励磁损耗。

若励磁机可与主电机脱开并分别试验，则它所消耗的功率可用校准电机法测定。

如励磁机不能与主电机脱开，则测定励磁机吸收的功率可将主电机作为电动机空载运行，或用校准电机法试验。在上述三种方法中，励磁机吸收功率等于该整台机组在下列两种相同的条件下所测得总损耗之差，一种使励磁机带负载，另一种励磁机不加励磁，主电机由独立电源供给励磁。

6.3.6 负载杂散损耗

（1）负载杂散损耗（直流分量）的推荐值除非另有规定，假定负载杂散损耗的直流分量与电流二次方成正比。在最大额定电流时总杂散损耗值为：

1）无补偿绕组电机：

对电动机为额定输入的1%；

对发电机为额定输出的1%。

2）有补偿绕组电机：

对电动机为额定输入的0.5%；

对发电机为额定输出的0.5%。

对恒速电机，额定功率为最大额定电流和最大额定电压时的功率值。

对调压变速电动机，每一特定转速时的额定输入应取该转速时最大额定电流乘以此时的外施电压。

对削弱磁场以提高转速的变速电动机，则额定输入为额定电压与最大额定电流时的输入。对用调节励磁保持恒压的变速发电机，额定输出应取额定电压与最大额定电流时的线端输出。相当于满磁场转速时的杂散损耗推荐值应按前述1）和2）规定，其他转速时的杂散损耗值用表1.8-4所列系数与其相乘计算。

表1.8-4 不同速比时的系数

速 比	系 数
1.5∶1	1.4
2∶1	1.7
3∶1	2.5
4∶1	3.2

表中第1栏速比指某一实际转速与连续运行的最低额定转速之比。

表中没有列出的速比其相应的系数可用插入法求得。

对由静止交流器供电的直流电动机，当电枢电流的纹波因数（见GB 755—2000中2.29）大于0.1时，上述规定的杂散损耗值，还应考虑加上由电枢电流的交流成分所引起的附加损耗。

（2）负载杂散损耗直流分量的测定采用单电源对拖回馈法（见6.2节和图1.8-15），此法适用于测定负载杂散损耗的直流分量。两台完全相同的电机机械上耦合在一起，电气上连接在一起，由直流电源供电，电机为他励。作为以发电机方式运行的电机与升压机串联。以电动机方式运行的电机由电源供给额定电压和额定电流，对以发电机方式运行的电机，调节电源电压使发电机为额定电压和额定电流。电动机和发电机应以对应试验负载下产生电动势所需磁通运行。

如有轴带励磁机，励磁机与其电源和励磁绕组分开，被

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

试电机改为他励。

待被试电机热平衡时，测量并记录：U_M、I_1、U_B、I_B、I_m、n、θ_c。

额定电流时负载杂散损耗的直流分量

$$P_{s.d.c}=\frac{1}{2}[P_1-\Sigma(P_{Fe}+P_{fw})-\Sigma P_a-P_{con}-2U_b(I_1+I_B)-2I_BU_b] \quad (1.8\text{-}69)$$

$$P_1=U_MI_1+U_BI_B \quad (1.8\text{-}70)$$

式中，$\Sigma(P_{Fe}+P_{fw})$为两台电机的铁损耗和风摩损耗之和；ΣP_a为两台电机电枢回路在试验温度下的I^2R损耗之和；P_{con}为试验用连接导线I^2R损耗。

对非额定电流负载杂散损耗，用表1.8-4所列的系数。

(3) 负载杂散损耗交流分量的测定

试验电源为合适的整流器电源（见GB/T 20114—2006），通过通常的负载试验，按下式计算负载杂散损耗的交流分量

$$P_{s.ac}=P_1-I^2R_a \quad (1.8\text{-}71)$$

式中，P_1为电动机的交流输入功率；R_a为试验温度下电枢回路直流电阻；I为电枢回路电流交流分量的有效值，r.m.s。

对串励电动机，交流输入功率的一小部分产生电动机转矩，通常可以忽略不计。

7 变频器供电三相笼型感应电动机确定损耗和效率的试验方法

变频器供电为非正弦波电源，电动机由变频器供电时，因谐波电压和谐波电流的存在，电动机内除有基波电压和基波电流产生的已知损耗外，还会再产生新的杂散损耗，称为新生杂散损耗。新生杂散损耗的大小和特性与变频器的类型、参数及电动机的设计和滤波电路的设计有关。目前广泛采用的是电压源型变频器。

当电动机由电压源变频器供电时，新生杂散损耗几乎与电动机负载电流、转速和磁通（电压）无关，新生杂散损耗如同空载时产生的损耗（IEC 60034-25 5.2）。

7.1 测量仪表的要求

应使用测量电流、电压有效值的仪表和有功功率表。在输入—输出法中，测量结果的准确度取决于功率表、转矩和转速测试设备的准确度。

考虑到谐波产生损耗的作用，应仔细选择测试设备，使其能在相应频率范围内有足够的准确度，以下是对互感器、传感器以及分流电路等测试设备所要求的频率范围：

$f_r=10f_1$（对六阶梯波变频器）

$f_c=6f_p$（对PWM变频器，最高为100kHz）

式中，f_1为最高额定频率；f_p为最高脉冲频率（载波频率）。

对于六阶梯波变频器，普通的电动式仪表即能满足这些要求；对于PWM变频器，必须使用宽频段的设备，优先使用带AD变换器和数字式数据微处理机的电子式仪表。

需要注意如下四点：

1）脉冲频率高的场合不宜使用两表法（Aron接法）。这是因有电容电流存在，输入电流之和可能不为零。因此，应采用每相用一个功率表的测量方法。

2）可以认为以下准确度的适用测量设备可以达到要求，功率0.2%，转矩0.2%和转速0.1%。

3）变频器的输出谐波及其主要次数决定于调制方法。

4）对常用的指示仪表（见GB/T 7676.1），其准确度是按标称频率规定的（如对40～60Hz），而在其规定的上限频率，其准确度等级容许有附加误差（如在1000Hz时为0.4%）。电子式测量仪表通常均给出频率范围，指规定的上限频率，所规定的准确度既适用于50 Hz或60Hz，也适用于规定的上限频率。以下称此为仪表的频率范围。

7.2 输入—输出法确定效率

按GB/T 1032中10.3条所述的输入—输出法进行测试。测量结果包括了所有的杂散损耗。所用的功率表、转矩测量仪和转速表应有足够的准确度和适用的频率范围。

输入—输出法适用于电压源型变频器和电流源型变频器。效率测试应在指定的变频器供电情况下进行。

7.3 损耗分析法——变频器供电空载和负载试验确定效率

本法适用于电压源型变频器供电的电动机，测试应在指定的变频器供电情况下进行。

(1) 新生杂散损耗P_{sa}

按本章4.4.3节所述的方法进行空载试验，按式（1.8-11）确定电机的恒定损耗P_k，此P_k中包括新生杂散损耗。若已知其风摩耗P_{fw}（如用正弦波电源空载试验，按4.4.4节（2）求得P_{fw}，或用转矩法求得P_{fw}。）和正弦波电源供电时铁损耗P_{Fe}，则可以认为新生杂散损耗

$$P_{sa}=P_k-P_{Fe}-P_{fw} \quad (1.8\text{-}72)$$

(2) 综合铁损耗P_{Fes}

正弦波电源供电空载试验求得的铁损耗中包括空载杂散损耗。如果将新生杂散损耗P_{sa}归入空载杂散损耗中（因为P_{sa}与负载电流无关），定义综合铁损耗

$$P_{Fes}=P_k-P_{fw} \quad (1.8\text{-}73)$$

式中，P_k为变频器供电时恒定损耗；P_{Fe}为正弦波电源空载试验求得的铁损耗；P_{fw}为工频电源空载试验时求得的风摩损耗。

(3) 转子I^2R损耗

变频器供电转子I^2R损耗等于电磁功率（气隙功率）乘以转差率。电磁功率等于电动机输入功率减去定子绕组I^2R损耗与综合铁损耗P_{Fes}之和。

(4) 总损耗P_T和效率η

$$P_T=P_{fw}+P_{Fes}+P_{Cu1s}+P_{Cu2s}+P_s \quad (1.8\text{-}74)$$

式中，P_{fw}为正弦波电源空载试验；P_{Fes}为变频器供电空载试验，按式（1.8-73）求得的综合铁损耗；P_{Cu1s}为变频器供电负载试验，按式(1.8-13)求得的规定温度下定子绕组I^2R损耗；P_{Cu2s}为变频器供电负载试验，按式（1.8-16）求得的规定温度下转子绕组I^2R损耗；P_s为正弦波电源供电时负载杂散损耗。

效率

$$\eta=1-\frac{P_T}{P_1} \quad (1.8\text{-}75)$$

式中，P_1为变频器供电负载试验电动机输入功率。

7.4 量热法确定效率

量热法特别适用于确定变频器供电电动机的效率，因为损耗的测量与电压和电流的波形无关。本法适用于电压源型变频器和电流源型变频器。

测量按GB/T 5321—1985，4.5条规定的热量校正法进行。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

8 间接法确定旋转电机温升

间接法适用于因不能加载到规定条件（额定或其他负载）进行热试验的电动机和发电机。应依据应用场合，设备条件，电机类型及对试验结果准确度要求选择试验方法。间接法仅是近似的模拟电机在正常额定负载条件下产生的热状态。用间接法获得的试验结果，根据制造商和客户之间的协议，作为评价电机的温升是否符合 GB755 要求的基础。

8.1 三相感应电动机

8.1.1 感应电动机叠加法

（1）降低电压、额定电流法

本法需要一个额定频率电压可调的电源和一个比被试电机定额小得多的负载发电机或制动设备。包括三项试验，每项试验需测量电压、电流、定子绕组损耗和定子绕组温升。三项试验如下：

m 试验：降低电压，额定负载电流，测得 U_m，I_m，P_{1m}和 $\Delta\theta_{1m}$。

n 试验：与 m 试验相同的低电压，但为空载，测得 U_n，I_n，P_{1n}和 $\Delta\theta_{1n}$。

o 试验：空载额定电压，测得 U_o，I_o，P_{1o}和 $\Delta\theta_{1o}$。

其中，$\Delta\theta_{1m}$为定子额定电流，近似额定的转子电流产生的 I^2R 损耗和空载降低电压下的铁损耗和风摩损耗所引起的定子绕组温升；$\Delta\theta_{1n}$为降低电压下的空载定子电流产生的 I^2R 损耗、铁损耗和风摩损耗所引起的定子绕组温升；$\Delta\theta_{1o}$为额定电压下的空载定子电流产生的 I^2R 损耗、铁损耗和风摩损耗所引起的定子绕组温升。

必须注意，对于大型感应电动机，m 试验可能出现转差率不会小于临界转差率（对应最大转矩的转差）的情况，在这种情况下，可选择在大于临界转差率时进行试验。用电阻法测量空载定子绕组温升，需采用某种措施迅速停机，或在负载下直接测量电阻。

本方法假定，每一项试验的冷却条件相同，其含义指转速实际上不变。

由下式确定的 $\Delta\theta_{1n}$值具有足够的准确度

$$\Delta\theta_{1n} = \Delta\theta_{1o}P_{1n}/P_{1o} \tag{1.8-76}$$

用上述给出的关系，可省略空载降低电压下 n 试验的发热试验，采用这种方式作为实用的替代方法。

对各种类型不同定额的电动机，所测温升的准确度在 $\gamma=-10\%$和 $\gamma=+6\%$的范围内。本法最适合于笼型异步电动机，估计其准确度 $\gamma=\pm3\%$的范围内。

结果可用下述的计算法或图解法求得。

1）计算法确定温升。对于铜导体，计算法假定在定子电流为额定值的任何负载下，定子绕组温升具有下述的线性关系

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta_{1p} + K_{1\Omega}^*/P_1 \tag{1.8-77}$$

式中，$\Delta\theta_{1p}$为理论上在额定电压和零电流时产生的定子温升（即温升是仅由铁损耗和风摩损耗产生的）；P_1 为特定负载下定子绕组损耗；$K_{1\Omega}^*$为定子绕组损耗和转子绕组损耗以及附加损耗（见 GB/T 755.2—2003 的 8.3）的热变换系数。

通过 8.1.1 的常规试验，可利用下式求出系数

$$K_{1\Omega}^* = \frac{\Delta\theta_{1m}-\Delta\theta_{1n}}{P_{1m}-P_{1n}} \tag{1.8-78}$$

即由于 m 试验和 n 试验中定子电流变化（铁损耗恒定）导致的定子温升增加正比于两个试验中定子损耗的增加。

理论上仅由铁损耗和风摩损耗产生的定子温升 $\Delta\theta_{1p}$可由下式求出

$$\Delta\theta_{1p} = \Delta\theta_{1o} - K_{1\Omega}^* P_{1o} \tag{1.8-79}$$

即由定子绕组损耗和铁损耗产生的温升减去定子绕组损耗产生的温升。

对于铜导线，在额定电流和额定电压时，定子绕组温升可由下式求出

$$\Delta\theta_{1N} = \frac{\Delta\theta_{1o} - K_{1\Omega}^* P_{1o} + K_{1\Omega}^* P_{1N}(\theta_A)(235+\theta_{AN})/(235+\theta_A)}{1-K_{1\Omega}^* P_{1N}(\theta_A)/(235+\theta_A)} \tag{1.8-80}$$

式中，θ_A 为测定 P_{1N}（θ_A）时的环境温度；θ_{AN}为基准环境温度；235 为铜导线在 0℃时电阻温度系数的倒数。

利用每次试验测得各部件的损耗值和温升值，可用类似方法求得转子绕组和定子铁心的温升。

2）图解法确定温升。图解法基于下列假设：

负载损耗只与电流有关，空载损耗只与电压有关。

温升可以相加，即热辐射效应可忽略，热变换系数与温度无关。

负载杂散损耗只与电流有关，实际上，此损耗也与电压有些关系。

这些假设本质上与上述 1）中所述的计算法的假设相同。通过 8.1.1（1）的三项试验可画出测得的绕组温升与定子电流平方的关系曲线，通过降低电压试验的两点（$\Delta\theta_{1m}$和 $\Delta\theta_{1n}$）可画一条直线，通过 $\Delta\theta_{1o}$作该直线的平行线。可得额定负载时的温升 $\Delta\theta_{1N}$，如图 1.8-16 所示。

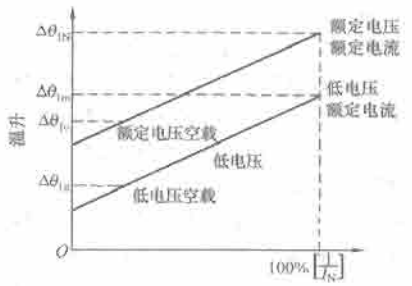


图 1.8-16 感应电动机图解叠加法

如果 n 试验和 o 试验的定子电流与额定电流相比足够小，则在额定电压和额定负载时的定子温升由下式求得

$$\Delta\theta_{1N} = \Delta\theta_{1m} + \Delta\theta_{1o} - \Delta\theta_{1n} \tag{1.8-81}$$

（2）额定电压降低电流法

本法包括两项试验。需要一个比被试电机定额小得多的负载发电机或制动设备。

加载方法可以是实际负载法或等效负载法。

在下列两项试验中测得定子温升和电流。

P 试验：电动机在额定电压和额定频率下降低负载运行。测量定子绕组温升 $\Delta\theta'_{1m}$和定子电流 I'_1，I'_1最好不小于 70%额定电流。

o 试验：电动机在额定频率和额定电压下空载运行。测量定子绕组温升 $\Delta\theta_{1o}$和定子电流 I_o。

满载温升由下式计算

$$\Delta\theta_{1N} = \frac{\dfrac{\Delta\theta'_{1m}-\Delta\theta_{1o}}{I'^2_1-I_o^2}\left(I_N^2\dfrac{235+\theta_{AN}}{235+\theta_m}-I'^2_1\right)+\Delta\theta'_{1m}}{1-\dfrac{\Delta\theta'_{1m}-\Delta\theta_{1o}}{I'^2_1-I_o^2}\dfrac{I_N^2}{235+\theta_m}} \tag{1.8-82}$$

式中，I_N 为定子额定电流；θ_m 为 P 试验时的环境温度。

对各种类型不同定额的电动机而言，所测温升的准确度

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

在 $\gamma=(-5\pm6)\%$ 的范围内。本法最适合于高压绕线转子感应电动机，估计其准确度在 $\gamma=\pm1\%$ 的范围内。

绕线转子感应电动机叠加方法：

a 试验：转子绕组短路，电动机在额定电压和额定频率下空载运行。定子绕组温升主要由铁损耗和风摩损耗决定。

b 试验：电动机在转子侧励磁，定子绕组短路，驱动电动机在额定转速下运转。调节转子电流使定子电流达到额定值。定子绕组温升主要由定子 I^2R 损耗决定。定子绕组短路以及电压降低时铁损耗也降低，风摩损耗不变。

两项试验测得的定子绕组温升相加便得到在额定电压和额定电流下的定子绕组温升。由于 a 试验中空载定子铜损耗和 b 试验中的风摩损耗的微小作用，计算出的定子绕组温升比实际温升略高。

由于尚不知用这种方法确定温升试验数据的对比情况，专家估计本法的准确度在 $\gamma=\pm10\%$ 的范围内。

8.1.2 感应电动机等效负载法

（1）正向短路试验法

被试电动机由辅助电机驱动在额定转速运行并由电源供电，电源的频率约为被试电动机额定频率的 80%或 120%。调节电源电压直至被试电动机电流为额定值止。当电源频率约为被试电动机额定频率的 80%时，被试电动机以负转差感应发电机的方式运行，输出电功率；当电源频率约为被试电动机额定频率的 120%时，被试电动机以正转差感应电动机的方式运行，由辅助电机输出电功率。

与直接法满载试验比较，定子基频 I^2R 损耗相同，风摩损耗相同，基频定子铁损耗偏低，转子导条电流和转子铜损耗及高频定子齿铁损耗偏高。

通常，高频损耗的增加不足以补偿基频铁损耗的减少。因此应补充两项空载试验，其一是额定频率，额定电压下空载试验；另一空载试验是额定频率，空载电压为正向短路试验时施加的较低电压。此两项空载试验的定子温升差与正向短路试验测得的温升之和为电动机的温升。为了确定正向短路试验法的总损耗是否等于直接负载法试验时的总损耗，有必要测量被试电动机的输入和输出功率，或计算电动机在正向短路试验状态时的总损耗。

当只有 50Hz 的电源时，此法对各种额定的 60Hz 电动机是适用的。同样，当仅有 60Hz 电源时，对各种定额的 50Hz 电动机也是适用的。试验时，用齿轮箱、交流变速驱动装置或直流电动机使辅助电动机达到规定转速。

对不同类型，各种定额的电机，此法确定的温升准确度在 $\gamma=\pm10\%$ 范围内。

此法更适合于低压绕线转子感应电动机，估计其准确度在 $\gamma=\pm3\%$ 范围内。

由于电机中不同部件内损耗明显的重新分配，必须自始至终仔细监视电机各部件的温度。如果某点的温度过高，即终止试验。

（2）直流注入法

被试电动机由交流发电机电源供电并在空载额定电压下运行。电动机和发电机都是星形接法，且两者的中性点是可用的。电源可以是对称多相励磁绕组的发电机（或绕线转子感应发电机），由周期变化的低频 f_{cx} 多相电流励磁。直流电源接在两个中性点中间，如图 1.8-17 所示。调节直流输出电流直到交流空载电流的有效值加上注入的直流电流等于电动机的满载电流为止。电源发电机提供额定电压并能承受额定电源。

目前尚不知本法试验数据的对比情况，专家们估计本法的准确度在 $\gamma=\pm10\%$ 的范围内。直流电源建立的是空间静止磁场，其极数是定子极数的 3 倍。由于转子旋转而产生的磁通和电流，在转子中就有额外的损耗。

电流测量使用有两根抽头的电流互感器，一个为“正”向，另一个为“反”向，这样直流分量就抵消了。

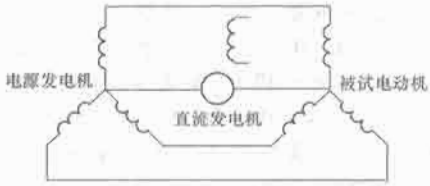


图 1.8-17 注入直流电流等效负载试验线路

（3）叠频或双频法

1）定子馈电。电动机的定子同时由两个不同频率的电源供电（见图 1.8-18），一个是主电源，另一个是副电源。或者在主发电机和电动机之间经三相变压器与副发电机连接（见图 1.8-19）。主频率和副频率电压的相序应相同。电动机的电流、电压和转速以差拍频率摆动。主发电机为额定频率，副发电机的输出电压和频率是可调的。副电源的频率通常约为额定频率的 80%或 120%，副电压是额定电压的 20%～30%。副频率的选择在某种程度上是以这种摆动不妨碍准确读数为准。

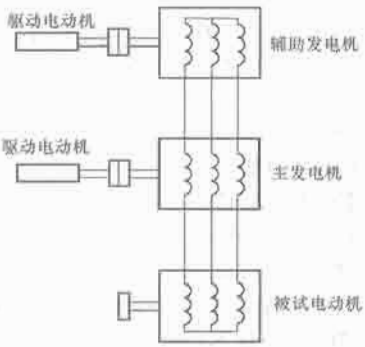


图 1.8-18 叠频试验——两发电机串联

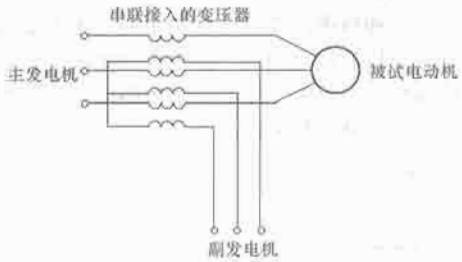


图 1.8-19 叠频试验——串联接入变压器

电动机首先由主电源供电并空载运行，然后逐步增加副发电机的输出电压（必要时也调节主发电机的电压）直到同时达到下列条件：

①电动机摆动电流的有效值等于额定电流。

②电动机摆动电压的有效值等于额定电压。

③转速等于额定转速。

如果调节电动机的摆动电流和摆动电压精确等于额定值有困难，可以调节电动机输入功率使其等于满载总损耗。在额定转速，电流和电压接近其额定值时进行试验。

对于 315kW 及以下笼型感应电动机和低压绕线转子感应电动机，准确度在 $\gamma=+3.0\%$ 和 $\gamma=-13\%$ 的范围内。

对 7000kW 及以下高压绕线转子感应电动机，准确度在

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$\gamma=\pm3.0\%$范围内，但对某些发热水平低的电机，误差可达$\gamma=\pm20\%$。

对主电源频率为50Hz，副电源频率为40Hz，根据主、副频率的转速/转矩和转速/电流曲线可推导出电动机的工作点，如图1.8-20所示。50Hz电源产生的正转矩（A点）被40Hz电源产生的负转矩（B点）平衡。有效电流（net current）主要是由40Hz电源供给的电流（C点）决定的。因为对于50Hz而言，电动机工作转差率很低（因而低电流）。对主电源是50Hz，副电源是60Hz而言，60Hz产生的正转矩被50Hz产生的负载转矩所平衡，有效电流主要是由60Hz电源供给的电流所决定。

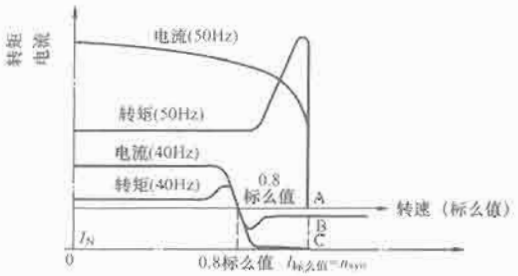


图1.8-20 叠频试验运行点处电流和转矩的组合

叠频组合产生的有效频率（net frequence）按下式随时变化

$$f=\frac{f_1+k^2f_2+k(f_1+f_2)\cos2\pi(f_1-f_2)t}{1+k^2+2k\cos2\pi(f_1-f_2)t} \tag{1.8-83}$$

式中，$k=\lambda f_1/f_2$。

通常，上式各数值如下：

主电源频率 $f_1=50$Hz

副电源频率 $f_2=40$Hz

副电压/主电压 $\lambda=0.25$

在此条件下，工作频率在48Hz和53.3Hz之间变化，即$50^{+3.3}_{-2.0}$Hz，环绕50Hz不对称变动。

2）转子馈电。对绕线转子感应电动机，叠频方法是副电源与转子回路连接而不是与定子连接，如图1.8-21所示。调节副电源电压和频率以便建立起额定的定子电流或正常定子馈电法时电动机的额定损耗。副电源的相序是，定子短路时转子的转向与主电源定子馈电转子短路时的转向相同。副电源频率，小于主电源频率的一半。

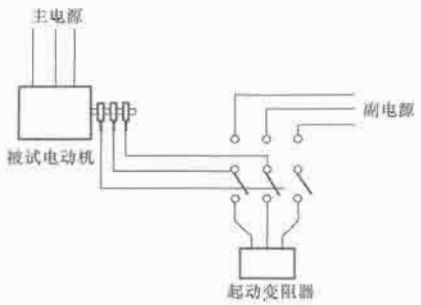


图1.8-21 转子馈电叠频法

3）叠频试验时的振动力度。由于定子（或转子）两种频率电流和磁场的组合，轴转矩就有可观的振荡分量，振动水平有大于正常值的趋势。由于电流和磁通的频谱宽，就增加了发生机械共振的机会，为此希望试验时监视振动水平，以防发生损害。

叠频试验完成后，电动机仅以主电源供电在额定电压下运行，尽快测量电动机在满载运行温度时的振动水平。电动机的温度由热电偶温度计监视，以确保温度接近满载时的数值。假如温度低于可接受水平的话，混频试验可再持续一段时间。

8.2 三相同步电机

8.2.1 同步电机叠加法

（1）开路、短路、零励磁电流法

同步电机由辅助电动机驱动到额定转速，做如下三项试验：

m试验：电枢绕组短路，调节励磁电流，使电枢电流为额定值。

n试验：电枢绕组开路，调节励磁电流，使电枢电压为额定值。

o试验：电枢绕组开路，零励磁电流。

各项试验测定的电枢绕组温升分别是$\Delta\theta_{1m}$，$\Delta\theta_{1n}$，$\Delta\theta_{1o}$。在额定转速，额定电压和额定电流时的电枢绕组温升由下式确定

$$\Delta\theta_{1N}=(\Delta\theta_{1m}-\Delta\theta_{1o})+(\Delta\theta_{1n}-\Delta\theta_{1o})+\Delta\theta_{1o}$$

[即$(\Delta\theta_{1m}-\Delta\theta_{1o})$是$I^2R$损耗引起的温升，$(\Delta\theta_{1n}-\Delta\theta_{1o})$是铁损耗引起的温升，$\Delta\theta_{1o}$是风摩损耗引起的温升]

除大型透平同步电机外，同步电机电枢绕组温升的实际准确度$\gamma=-10\%$。

同样，如果在上述三项试验中能测得励磁绕组温升的话，也能确定在额定工况下励磁绕组的温升。如能做第四项试验可以提高本法的准确性，即或电枢绕组开路，调节励磁电流到额定值，电枢过电压，或电枢绕组短路，电枢电流大于额定值。由此两试验之一测得的温升分别代替n试验或m试验测得的励磁绕组温升。因为电枢绕组可能受损伤，应事先得到制造商的许可。

还有一种方法是电机作为同步调相机在额定励磁电流和某个中间的电枢电流下运行，直到励磁电压稳定。励磁电压（对电刷压降修正后）除以励磁电流即得励磁绕组热电阻，根据此热电阻可计算励磁绕组温升。

可用作图法求得额定负载时励磁绕组温升，如果可由$I_{f1}^2R_{f1}$求得每项试验的励磁损耗P_{f1}，其中P_{f1}、I_{f1}和R_{f1}分别是励磁损耗、励磁电流和励磁绕组电阻的试验值。三项试验励磁绕组温升对励磁损耗的关系用曲线表示，此曲线近似于直线，如图1.8-22所示。然后画第二条直线，显示在额定励磁电流下，因励磁绕组电阻从环温下的数值随温度上升而增加所引起的励磁损耗的变化。这两条直线的交点即为额定负载时励磁绕组的温升。

（2）零功率因数和开路空载法

被试电机由辅助电机驱动到额定转速，做如下试验：

m试验：额定励磁电流，额定电枢相电流，零功率因数，降低的电枢相电压。

n试验：电枢绕组开路，相电压等于m试验中的电枢感应电动势，即

$$U_n=U_m+I_mX_L \tag{1.8-84}$$

式中，X_L为定子漏抗设计值。

o试验：定子绕组开路，相电压等于额定负载时的感应电动势，即

$$U_o=\sqrt{(U_N+I_NX_L\sin\varphi)^2+(I_NX_L\cos\varphi)^2} \tag{1.8-85}$$

式中，$\cos\varphi$为额定功率因数；U_N为额定电枢相电压；I_N为额定电枢相电流。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

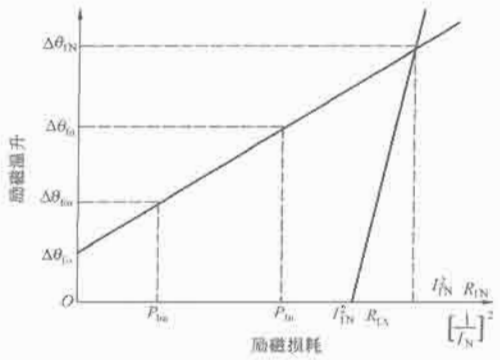


图 1.8-22 额定负载时励磁绕组温升的求取（同步电机）

R_{fA}—环温时励磁绕组电阻；R_{fN}—额定负载时励磁绕组电阻；I_{fN}—额定励磁电流

电枢绕组温升

$$\Delta\theta_{lN} = \Delta\theta_{lm} - \Delta\theta_{ln} + \Delta\theta_{lo} \qquad (1.8\text{-}86)$$

式中，$\Delta\theta_{lm}$、$\Delta\theta_{ln}$和$\Delta\theta_{lo}$分别是在 m、n、o 试验中测得的电枢绕组温升。

$\Delta\theta_{lm}$是由额定励磁电流、额定电枢相电流和额定转速时的风摩损耗及降低电压下铁损耗引起的电枢绕组温升。

$\Delta\theta_{ln}$是由开路相电压为U_n时的励磁电流、额定转速时的风摩损耗和降低电压下时的铁损耗引起的电枢绕组温升。

$\Delta\theta_{lo}$是由开路相电压为U_o时的励磁电流、额定转速时的风摩损耗和额定电压下铁损耗引起的电枢绕组温升。

对定额在 500kVA 及以下的同步电机，公认的电枢绕组温升准确度$\gamma=-10\%$。

取 m 试验中励磁绕组温升实测值作为励磁绕组的温升。

8.2.2 等效负载试验—零功率因数法

被试电机在适当的定子电流，电压和频率下以同步调相机方式运行。过励的被试电机与空载欠励运行的负载同步电机电连接。调节被试电机的励磁电流及其负载电流。定子电流要保持恒定，端电压可以是变化的。因为过励零功率因数是滞后于定子漏抗的电动势E_p，大于相同的端电压、定子电流而功率因数较高时的电动势，因此试验端电压可以降低到其相应的E_p，与额定负载时的E_p相同。以此法测得的定子温升作为额定负载时的温升。

励磁绕组的损耗与正常工作时相差很大，因此用电阻法测得的励磁绕组温升应按额定励磁电流时的损耗进行修正。可以认为温升与励磁绕组的I^2R损耗成正比

$$\Delta\theta_{fN} = \left(\frac{I_{fN}}{I_{ft}}\right)^2 \Delta\theta_{ft} \frac{235 + \Delta\theta_{AN}}{235 + \Delta\theta_{ft} + \theta_{Ft} - \left(\frac{I_{fN}}{I_{ft}}\right)\Delta\theta_{ft}} \qquad (1.8\text{-}87)$$

式中，I_{fN}为额定励磁电流；I_{ft}为实测励磁电流；θ_{AN}为基准环境温度；θ_{Ft}为实测环境温度；$\Delta\theta_{ft}$为实测励磁绕组温升。

忽略电阻随温度变化的影响，可用下面简化公式，但准确度较差

$$\Delta\theta_{fN} = (I_{fN}/I_{ft})^2 \Delta\theta_{ft} \qquad (1.8\text{-}88)$$

上述计算励磁绕组温升的公式，忽略定子和转子表面及风阻损耗的影响。

对表面线速度高的电机，例如透平型发电机，不可忽略风摩损耗对励磁绕组温升的影响，励磁绕组温升按下式确定

$$\Delta\theta_{fN} = (I_{fN}/I_{ft})^2(\Delta\theta_{ft} - \Delta\theta_{fw}) + \Delta\theta_{fw} \qquad (1.8\text{-}89)$$

式中，$\Delta\theta_{fw}$是被试电机驱动到额定转速且其电枢和励磁绕组开路时实测的励磁绕组温升。

对于额定功率因数大于 0.9（尤其是额定功率因数为 1）的电机，由于受励磁绕组发热的限制，零功率因数法可能不适用。对这种电机，将励磁电流调节到额定值，降低端电压使定子电流为额定值。这样定子I^2R损耗等于其额定值。由于铁损耗降低致使定子温升降低，虽然这种影响与铜损耗的影响相比是比较小的，但也需要修正，以补偿定子铁损耗降低对温升的影响。可以补充两个开路试验求此修正量：

1）调节励磁电流使开路电压等于降低的端电压。

2）调节励磁电流使开路电压等于额定端电压。

实测上述两项试验的定子绕组温升，将此两项试验的温升差值与等效负载试验的实测温升值相加。

等效负载法不适用于短时定额电机，因为等效负载需要足够长的时间才能使电机达到热平衡。

8.3 直流电机叠加法

大型直流电机大多采用对拖回馈法进行试验，直流电机仅有一种间接试验方法可用。此叠加法是被试直流电机由辅助电动机拖动到额定转速，辅助电动机的定额通常约为被试电机的 20%。做如下三项试验：

m 试验：电枢绕组短路，调节励磁电流使电枢电流为额定值。

n 试验：电枢绕组开路，调节励磁电流使电枢电压为额定电动势。

o 试验：电枢绕组短路，零励磁电流。

对定额 1000kW 及以下的电机，进行两项开路试验时，电刷应提起，但测量电枢电压时除外。对于定额大于 1000kW 的电机，电刷可不提起，因为电刷的摩擦损耗与其他损耗比数值较小。

第三项试验仅对转子表面线速度大于 30m/s 的高速电机是必要的，因为风阻损耗对温升有明显的影响。

确定每项试验电枢绕组温升，$\Delta\theta_{lm}$、$\Delta\theta_{ln}$和$\Delta\theta_{lo}$。在额定转速、额定电压和额定电流时电枢绕组温升由下式确定

$$\Delta\theta_{lN} = \Delta\theta_{lm} + \Delta\theta_{ln} - \Delta\theta_{lo} \qquad (1.8\text{-}90)$$

即温升等于电枢I^2R损耗和风摩损耗（不计铁损耗和励磁I^2R损耗产生的温升）加上由铁损耗和风摩损耗（零电枢I^2R损耗）以及额定励磁I^2R损耗产生的温升，减去由风摩损耗产生的温升。

电枢绕组温升的准确度约在$\gamma=\pm10\%$的范围内。

9 现代测试技术在交流电动机测试中的应用

电动机测试是指利用测试系统和测量设备，通过一系列特定项目的试验和测量，取得电动机在特定状态下的运行数据，诸如电压、电流、功率、温度、电阻等，并对运行数据进行处理，获得相关特性曲线，并进一步传输、处理、分析、报告，最终目的是获得被试验电动机的性能参数。

获取信息数据是电动机测试的首要任务，而测试系统及测量设备则是电动机测试的有力工具和支撑。现代测试技术不断进步，出现了智能化仪器、PC 仪器、总线仪器、虚拟仪器等，近年来网络技术风靡于世，在测试领域同样得到良好的应用，对电动机测试也产生了深远的影响，转变了传统测试观念。

9.1 虚拟仪器测试系统

计算机、微电子、通信等技术的迅猛发展为测试技术提供了强有力的硬件支援，使虚拟仪器的测试成为可能。

以 Compact PCI 总线的第三代工控机在自动化测控系统

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

中应用广泛。在电动机测试中，一种以 CompactPCI 总线工控机为核心组成的 PC-based 电动机虚拟测控系统，包括控制平台、外围 I/O 模块、数据通信、现场总线、人机接口以及软件等部分组成。控制平台由 CPU 主板、机箱、电源、无源背板组成。I/O 模块的功能是连接计算机和测试系统控制对象，进行信息传递及交换。对测控系统的控制主要包括模拟量的输入输出，开关量的输入输出。模拟量的输出是利用 D/A 板将经过计算机处理的数字量控制信号转换成标准电压或者电流信号送达执行机构（如励磁控制系统等）。模拟量的输入则需要通过传感器或者变送器等将被测信号（如电压、电流、温度、电阻）转换成标准的电压或者电流信号，然后将该模拟量通过 A/D 板转换成数字量，送达 CPU 进行相应的处理和计算。对于系统中大量的开关量控制信号（0 或者 1），则直接利用数字输出经过适当放大直接控制执行部件的动作，对于动作结果也可以直接利用开关量进行输入，以检测执行结果。以上这种多种类 I/O 模块及工控机控制平台基本能够组成完整的测控系统，在电动机测试领域中成为典型的应用系统。

基于表 1.8-5 中所列的若干功能模板，选择合适的计算机控制平台即可以组成电动机测控系统，利用典型的操作系统如 Win XP、LINUX 等，基于模块的组态软件编制电动机测试应用程序，开发周期短，安装调试方便，相应降低成本，适合于量大面广的国内电动机生产厂家。

表 1.8-5 I/O 模块类别

信号来源及用途	信号类别	模 板
电压、电流、温度、转速、转矩电阻等模拟信号来自被测试电动机实际运行中	模拟量输入信号	模拟量输入板
接触器、继电器等接点通断状态信号，0 或者 1	开关量输入信号	开关量输入板
接触器、继电器等接点的通断控制信号，0 或者 1 电平	开关量输出信号	开关量输出板
励磁、控制器等的控制信号来自计算机的数字量输出	模拟量输出信号	模拟量输出板
其他辅助设备（如冷却油箱的流量等）的输出信息来自计算机的数字量输出	模拟量输出信号	模拟量输出板
紧急停止、事故中断或者报警中断等中断信号	中断输入信息	多通道中断控制模板
串并联通信信号	通 信信号	RS232/485 通信模块

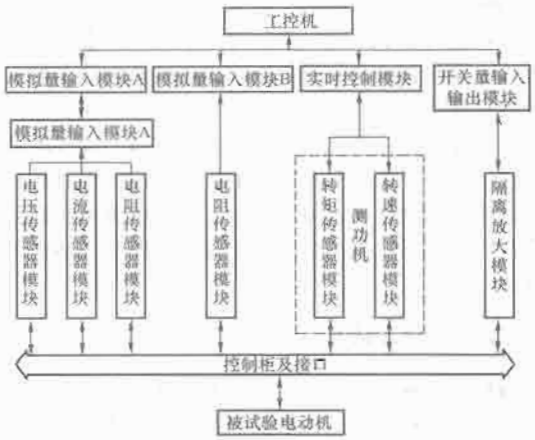


图 1.8-23 虚拟仪器电动机测试系统

图 1.8-23 是典型的电动机性能虚拟仪器测试系统，其主要由工控机、实时监控模块、测功机以及被试验电动机四部分组成。

9.2 总线技术在电动机测试系统中的应用

总线是指计算机、测试设备构成的测试系统内部以及相互之间传递信息的公共通道。利用总线技术可以极大地简化测试系统结构，有利于系统的兼容性、开放性、可靠性及可维护性，总线技术的持续发展推动了现代测试技术水平的提高及系统成本。

CAMAC 总线已经很少被采用。VXI 总线是当今国际上测量仪器的主体总线，可以满足科学技术发展的测试需求，但是因为其价格较高，推广应用受到限制，主要应用在航天、军工等领域。GPIB 总线应用已经多年，尤其是 8 位并行总线，传输速率及传输距离有限，在大规模测控系统中应用较少，在电机测试中 GPIB 的应用非常适合。近年发展的 USB 总线及 IEEE 1394 串行总线，也是测试仪器总线发展的方向，其热插拔和即插即用备受推崇，传输速度及传输方式的多样也是其强烈的魅力所在。

GPIB 总线是 IEEE 488 通用接口总线，其采用的是在计算机内插一块 GPIB 接口卡，通过 24 芯或 25 新电缆连接到仪器端的 GPIB 接口上，将多个带有符合国际标准的 GPIB 接口的测试设备自由组合在一起就能组成一个电机测试系统。系统中多个 GPIB 设备可以按照功能分为控制、发令者、听令者。某些设备可以具有三种功能，但是在同一时候只能允许其中一种发挥作用。GPIB 系统是由若干设备集合组成的，系统组建非常方便，单个设备也可以单独使用，因此非常灵活，这种积木式结构非常适宜于电机测试系统，需要的即搭配上。例如 GPIB 电力计，测量电压电流功率。GPIB 控制器，测量转矩转速，并控制测功机。GPIB 传感器信号测量部分，测量热电偶（温度），其他如流量等模拟信号。以上几个部分即组成了一个完整的电机测试系统，如图 1.8-24 所示。

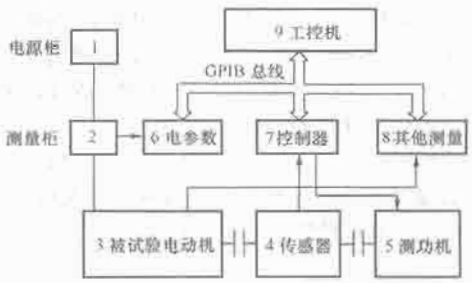


图 1.8-24 GPIB 总线模式电机测试系统

9.3 网络化测试技术

目前网络化正成为测试领域的发展方向，包括 VXI 在内的许多测试技术标准都推出了相应的测试设备上网规范。仪器标准将向计算机标准、网络规范靠拢。根据网络化测试技术的特点，我们试将服务于人们从任何地点、在任何时间都能够获取到测试信息（或数据）的所有硬、软件条件的有机集合称为“网络化仪器”。

测试技术与仪器的网络化已经在广泛的测控领域初见端倪。控制局域网络（CAN）现场总线已经开发并已被制订为国际标准 ISO 11898。它广泛应用在离散控制领域。其模型结构取 OSI 七层模型中的物理层、数据链路层和应用层。通信速率最高可达 1Mbit/s/40m，直接传输距离最远可达

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

10km/5kbit/s。可挂接设备数量最多可达 110 个。网络化传感器在智能传感器基础上，把 TCP/IP 协议嵌入现场智能传感器的 ROM 中，利用局域网或广域网，处在测控点的网络传感器将测控参数信息加以必要的处理后登临网络。在电动机的测试领域中，网络化测试已经被广大技术人员所重视。测控系统的设计思想受到计算机网络技术的影响。测控网络正由原来的集中模式转变为分布模式，成为具有开放性、可互操作性、分散性、网络化、智能化的测控系统。网络的节点上不仅有计算机、工作站，还有智能测控仪器仪表。测控网络的体系结构和通信模型与信息网络相似，比如目前测控系统中迅猛发展的现场总线，它的通信模型和 OSI 模型对应，将现场的智能仪表和装置作为节点，通过网络将节点连同控制室内的仪器仪表和控制装置连成有机的测控系统。

目前测试系统的网络化还是存在很多问题，制约了其在电动机测试领域的应用：①网络化测试设备间的同步问题。目前的网络技术虽然已经非常成熟，但是被广泛应用的网络技术（以太网、国际互联网等）基本上都是异步的，而对于电动机测试应用，因为各测试项目的数据通常都是紧密相关的，为了保证测试结果的正确性，必须保证各设备之间是同步工作的，也就是说整个测试网络内的测试设备必须在统一的时钟节拍下进行工作。目前还没有这样的同步技术可以被直接使用。②传统测试设备的上网改造技术。现存大量的传统设备中，一些具有数字接口（主要是具有 GPIB 接口的设备）。对这些设备进行网络化改造，可以延长其使用寿命，节省大量资金。③多功能数据总线接口控制技术。一个测试系统往往是由多种功能模块构成的，而且各功能模块也不一定是采用同一总线标准设计。为保证在技术上的继承性以及系统的可扩展性、兼容性，并实现各模块的“无缝隙”连接，必须采取多功能数据总线接口控制技术，将各种标准接口如 RS232、RS422、RS485、1553、1850、ISA、EPP、GPB、PXI、USB 及以太网等都很好地纳入系统体系结构中。

在电动机测试系统中，高精度、自动化、网络化是其发展方向，随着现代测试技术的蓬勃发展，电动机测试也日新月异。

9.4 电动机测量

电动机的性能测量依据性质分为出厂检查试验和型式试验，测试系统也相应不同。出厂检查试验因为流水线的生产节拍需求，必须满足快速、可靠性的要求，因此要求自动化程度高、稳定性好。型式试验系统则侧重于数据计算、处理，并且有更高的精度要求，因为其包括负载设备等辅助系统，整个系统更为复杂。

9.4.1 出厂试验系统

（1）出厂试验测试项目

每台电动机在出厂前，必须进行出厂试验，性能合格可附产品合格证。其主要目的是考核电动机的性能是否达到设计性能的基本要求。其试验项目主要有：机械检查，定子绕组对机壳以及绕组间绝缘电阻的测定，定子绕组在冷态下的直流电阻的测定，耐电压试验，匝间绝缘试验，空载和堵转的电流及损耗的测定，振动和噪声的测定。

（2）出厂试验系统及测试原理

系统主要由以下及部分组成：电压调压器、控制屏、操作台、仪表柜、工业控制计算机（试验软件、控制中枢）以及接线箱。其系统框图如图 1.8-25 所示。测试系统采用奔腾Ⅳ工业控制计算机作为控制核心。奔腾Ⅳ工业控制计算机计算速度快、可靠性高、抗干扰性强，能在恶劣环境下稳定工作。整个过程除接线由人工完成外，全部由计算机控制自动完成。测试的数据包括耐压、绝缘电阻、绕组冷态直流电阻、空载时的电压、电流、功率、堵转时的电压、电流功率等参数。堵转时不需人工卡住电机转子，而是以电机合闸瞬间采样测出电机的堵转电量参数。

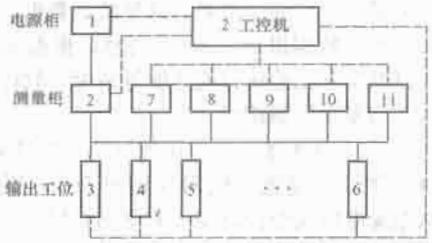


图 1.8-25 电动机出厂试验系统框图
（图中 7～11 为测量仪表）

试验原理是利用工业计算机通过 I/O 卡输出控制开关量，控制相应的执行部件如继电器、接触器等动作，达到自动切换试验项目的目的，由计算机通过仪表接口自动控制仪器仪表进行测量和读表，并且存储到计算机，进行数据记录的处理。测试软件利用 Windows 的 ODBC（开放数据库互联）数据库管理功能，以及通用的数据库格式（Microsoft Visual FoxPro 格式及 Microsoft Access 格式）预先将被试电机的相关参数全部存入数据库内。试验前只需用鼠标将试验电机的型号规格选中，程序就能自动按数据库的要求进行试验并判定结果，试验数据及结果存入记录文件和记录数据库中，可方便地对试验结果进行统计、查询。

（3）出厂试验主要设备

1）电源系统。电源系统包括试验用调压器，电源控制柜，根据被试验电动机的容量大小，来选取调压器的容量，保证最小投资的情况下充分满足试验项目的需求，如此在设计电源控制柜等方面均可以充分考虑出厂试验时间短、断续工作的特点，以减少投资。

2）测量系统。测量系统主要包括电参数的测量，如电压、电流、功率。测量柜则包括测量用电流互感器等，其他测量仪器有直流电阻测量仪、绝缘电阻测量仪，工频耐压测量仪以及匝间耐压测量仪、振动测量仪、噪声测量仪。为保证测试精度，仪器的满量程测试精度必须保证不低于 0.5 级，测量用互感器应不低于 0.2 级。

3）输出。根据试验能力来设计输出工位的多少，以 H160 及以下电机来说，设计 16 工位，基本能实现最大 480 台/8h 的试验能力，因为人工接线将占用很多的时间，输出 16 工位可以实现 8 工位进行试验，另 8 工位接线，如此大大提高工作效率。

（4）测试软件

1）测试软件。用 Visual C++6.0 语言在 Windows XP 操作系统环境下实现，应用软件效率高，容易使用。Windows XP 操作系统是当今使用最广泛的操作系统，充分保证用户能够得到有效的升级和技术支持。

2）系统控制。在全自动出厂系统中，由计算机控制系统的运行，计算机控制整个系统来自动切换试验项目，为充分保护系统的运行安全性及可靠性，由软件实现强电项目和弱电项目的互锁，并且在硬件上也实现不同项目的互锁，工控机计算并向专门的地址输出试验项目的控制代码。此代码控制相应的继电器和接触器发生动作，实现被试验电动机的通电、断电，同时计算机也实时检测继电器和接触器的相应

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

动作，判断动作的正确与否。对于非正常状态将进行重要设备的保护，主要控制线程为：将所有硬件的I/O口分类进行处理，试验项目（初始化端口，计算控制代码，输出控制代码，关闭）→主要执行部件动作→实时检测动作（检测动作端口地址的输入码，判断是否正确）→执行测试并通过RS232或485或CAN、GPB总线等端口实现与测试仪表的通信→反馈消息（试验动作准确、读到测试数据）→反应到主窗口（对读到的数据进行处理）。当然，根据实际输出工位的不同，以及实际试验项目的选取等情况，软件实现不同流向，但以上为基本控制路线。

3）测量。如上节所述，软件在控制执行部件动作以后，即开始测量。例如控制绝缘电阻仪输出500V测量电压信号，然后从绝缘电阻仪中读出实际测得的数据，对于不同项目，测试步骤可以简化到如下几步：

① 测试仪表初始化函数。

② 仪表写数字函数。

③ 仪表读数据函数。

④ 关闭函数及仪器刷新。

通过上述步骤的重复进行，工控机实现测试数据的读取。

4）数据的处理。读到测试数据以后，进行相应的计算，即可与数据库设定的数据域值进行比较，自动判断出数据合格与否。如果不合格，则可以判定为不合格或者重新测试一次，数据将自动送入测试记录的数据库中，方便实现数据共享、查询等，也可以按照用户自己的需求（如样式、具体项目、试验时间等）来打印数据记录。至此数据处理完毕，试验完成。

（5）小结

综上所述，以工业控制计算机为控制核心，以I/O控制模式来实现的电动机出厂试验检测系统，具有应用可靠，成本较低的优势。而且就整个系统来看，测试仪器的独立化有利于计量和维护，能充分保证测试精度，确保出厂检查试验的准确性。另外测试功能的模块化有利于充分利用系统资源，方便检修，一个模块出现问题不影响其他功能的使用。从实际应用效果来看，本系统的自动化程度高，可靠性高，故障率低，符合电动机出厂试验的实际使用需求。系统运行的安全性得到很大的提高，不仅在软件上进行实时监测，而且在硬上实现多重保护，免除误操作或者非正常状态的出现对系统造成损坏，甚至造成人身事故。在手动和自动两种操作模式的试验系统中，由于使用了PLC控制，简化了硬件电路和操作步骤，也实现了误操作的保护。

9.4.2 型式试验

电机型式试验的主要目的为确定电机所有性能参数，根据GB/T 1032—2005《三相异步电动机试验方法》的规定，主要试验项目有空载试验、负载试验、温升试验、堵转试验、T—n曲线试验、振动、噪声试验等。涉及的测量数据有绕组直流电阻、冷热态绝缘电阻、温度、电参数（电压、电流、功率）、转矩转速、堵转转矩、振动、噪声等。其中负载试验的试验方法繁多，整个系统也很复杂，主要包括1电源部分，2测量部分，3负载部分，4辅助设备，5控制台，6测试软件等。

由于试验系统的复杂性，在具体系统的设计中特别是大中型电动机的试验系统，局限于目前我国相关设备的发展，只能实现半自动测试，即人工调节负载设备，由计算机自动同步采样相关数据，并进行处理。因此由计算机作为采样数据并计算数据的半自动试验系统，近年来得到很好的发展，应用越来越多。

（1）试验电源系统

根据被试验电动机的容量，选配电源，可以为变压器、调压器、正弦波机组、变频电源等，应充分考虑到试验电源的质量，满足GB 1032中的相关规定。机组进行试验可以实现50Hz及60Hz的频率电源的试验，满足不同频率电机的试验需求，随着电子技术的发展，变频电源的质量也越来越高，容量也很大，能够满足中小电机试验电源的需要。

（2）测量部分

测量部分主要为电参数的测量，包括电压、电流、功率，测量仪器为电参数测量仪，辅助测试部件为电流互感器、电压互感器（1000V以上电动机），根据标准要求，其精度应不低于0.2级精度。输出功率的测量为转矩转速传感器及转矩转速测量仪。其他测量仪表包括直流电阻测量仪、绝缘电阻测量仪、转速测量仪、温度测量仪、堵转转矩测量仪等。

（3）负载设备

根据被试验电机的特点，可以选择多种负载设备，如直流机带电阻，直流机带机组反馈系统，磁粉制动器、涡流测功机、电加载回馈系统、同规格辅助试验电动机加变频电源系统，水力测功机加载系统等。

（4）辅助设备

如试验必需的试验平台、安装支架及联轴器等，大型试验系统还包括水冷却系统、油冷却系统甚至通风系统等。

（5）控制台

控制台的主要作用为起动试验电源，为试验做准备，切换和选取合适测量的电压、电流变比，对被试验电机的起动进行控制，控制辅助系统，如辅助电源的起动、频率的调节等，以及被试验电动机负载的调节，试验电压的调节等。

（6）测试系统软件

测试软件由上海电器科学研究所自主研发，符合GB/T 1032—2005《三相异步电动机试验方法》，采用光电隔离高精度数字仪表，利用工业控制计算机快速采样和高速处理数据的优势，组成积木式电机型式试验的自动测试及数据处理系统。其功能为：自动完成单相、三相异步或者同步电动机的型式试验中电压、电流、功率、绕组电阻、转速、转矩、T—n曲线、温度等数据的自动采集和输出；试验中能随时跟踪和显示各种特性曲线，试验结束后立刻输出各项完整的特性曲线；自动完成高质量的试验报告，用户可以自己设定报告模板，设计报告格式。该程序采用结构化、高效率的程序设计语言VC++语言编程。集数据采集、处理于一体。系统具有操作简便、功能齐全、提示清晰、测试精度高和自动判断试验结论等全方位功能。

1）软件通信总线。型式试验对于各参数采集的同步性要求比较高，数据采集量大，准确度要求高。例如在负载试验中，读取被试验电动机电参数的同时应该能读取其转速参数，同步性非常重要，直接影响到测试结果的准确度，普通仪器的RS232接口其传输速率只有几十kbit/s，加上仪器本身采样速度的局限，将严重影响到整个系统的采样。另外，某些动态测试，例如T—n曲线测试中，对被试验电动机输出转矩转速的测定则需要更高的速度，以取得更好的测试结果，通常要达到几十毫秒采样一次的速度。

在系统设计中采用了多种快速总线结构，MAGTROL公司电参数仪及测功机控制器就是采用GPIB接口，该接口

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

符合国际标准，该接口数据线为8根，用位并行、字节串行的方式传输数据，传输速度可达1Mbit/s，传输距离达20m，最多仪器小于15，因此该总线非常适合小型测试及控制系统。在小型电机试验系统中，利用MAGTROL的电参数表及测功机设计一种全自动负载测试系统，可以预先设定的负载而由系统自动加载，并读取相应的电参数及输出转矩、转速参数，从而实现负载参数的测试以及 T—n 曲线项目的试验。

另一种是利用CAN总线，将各个测量单元的CAN和RS232总线进行汇总，经过光电隔离形成标准的CAN网络，连接到计算机，CAN总线与普通RS232相比传输速度更高，传输距离也更远。

在通信技术上，已经突破了以往只能用RS232或者RS485接口通信，可以利用带有RS232、RS422、RS485、RS1553、RS1850、ISA、EPP、GPB、PXI、USB以及CAN接口等仪器组成灵活多样系统配置。

2）软件主要功能。软件集数据采样、数据处理为一体，窗口化界面操作，提示清晰，操作简单，对于完成的试验项目，能立刻计算结果、绘制相关曲线（见图1.8-26和图1.8-27），输出中英文试验报告。

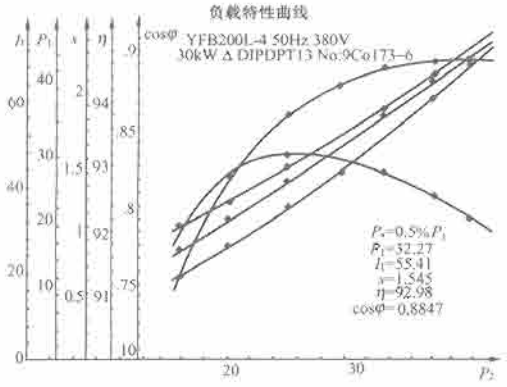


图1.8-26 绘制的负载特性曲线

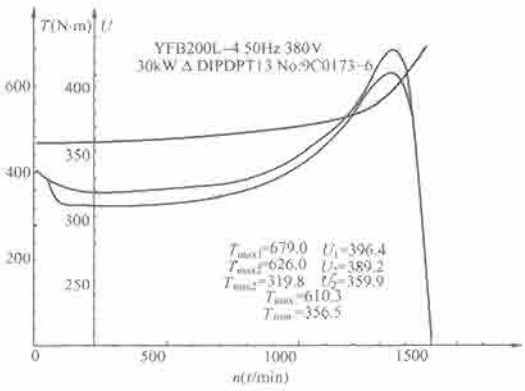


图1.8-27 软件绘制的 T—n 曲线

同时软件与整个系统相整合，能够自动实时监测系统的状态，例如电流、电压变比，可自动将电流、电压倍率等整合到结果计算中，同时记录里保留原始参数的记载。

软件还做了相应的仪器管理，对于参与测量的仪器进行记录，可以追溯其计量结果，非常适合实验室管理。

参 考 标 准

1. GB 755—2000《旋转电机 定额和性能》(idt IEC 60034-1：1996)
2. GB/T 1032—2005《三相异步电动机试验方法》
3. GB/T 1029—2005《三相同步电机试验方法》
4. GB/T 755.2—2003《旋转电机（牵引电机除外）确定损耗和效率的试验方法》(IEC 60034-2：1972 +A1：1995，+A2：1996，IDT)
5. GB/T 10068—2000《轴中高为56mm及以上电动机的机械振动 振动的测量、评定及限值》(idt IEC 60034-14：1996)
6. GB/T 10069.1《旋转电机噪声测定方法及限值 噪声工程测定方法》
7. GB/T 10069.2《旋转电机噪声测定方法及限值 噪声简易测定方法》
8. IEC 60034-17《变频器供电笼型感应电动机应用导则》
9. JB/T 10500.1《电机用埋置式热电偶 第一部分：一般规定，测量方法和检验规则》
10. JB/T 7836.1《电机用电加热器 通用技术条件》
11. JB/T 10098-2000《交流电机定子成型 线圈冲击电压水平》(idt IEC 60034-15：1995)
12. JB/T 9615.1《交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验方法》
13. JB/T 9615.2《交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验限值》
14. IEC 60034-2 Ed.4《旋转电机（牵引电机除外）确定损耗和效率的试验方法》
15. IEC 61986：2002《等效负载和叠加试验技术——间接法确定旋转电机温升》
16. GB/T 20114—2006《普通电源和整流电源供电直流电机的特殊试验方法》(IEC 60034-19 IDT：1995)
17. IEC 60034—25：2004《变频器供电笼型感应电动机设计和性能应用导则》

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第9章 电机的选用、运行节能和维护

1 电机选用原则

1.1 基本分类

电机产品的分类方式一般有以下几种：

1）按馈电电源的方式进行分类，一般可分为：

① 直流电机。直流电机又分为直流发电机和直流电动机。

② 交流电机。交流电机又分为同步电机和感应电机；同步电机又，分为同步发电机和同步电动机，感应电机通常指异步电动机（异步发电机的用量很少）。

2）按功率的大小或机座号或电压等级进行分类，一般分为微特电机、小功率电机、小型电机、中型电机和大型电机等。

① 微特电机。主要用于自动控制和计算机控制系统中的检测、放大、执行和解算元件。

功率范围：从数百毫瓦到数百瓦。

机座号范围：机座的外径一般不大于130mm。

② 小功率电机。又称为分马力电机，主要用于家用电器及各种小型机具等。

功率范围：≤2.2kW

机座号范围：≤H90mm

额定电压：大多数为220V、380V的常用电压。

③ 小型电机的范围一般为：

功率范围：0.12～315kW

机座号范围：H63～355mm

额定电压：在660V及以下，大多数为380V/220V常用电压。

④ 中型电机范围一般为：

功率范围：315～3000kW

机座号范围：H355～630mm

额定电压：常用的电压等级为6kV和10kV，少量为3kV。

⑤ 大型电机范围一般为：

功率范围：≥2000kW

机座号范围：≥H710mm

额定电压：目前常用的电压等级为6.3kV、10.5kV、13.8kV等。

3）按产品的用途进行分类，一般可分为：

① 发电机。通常用于电能的输出，有直流发电机、同步发电机和异步发电机等；对于同步发电机又有汽轮发电机、燃气轮发电机、柴油发电机和水轮发电机及异步发电机等。

② 电动机。通常是用于驱动各种机械设备的动力源；电动机的种类繁多，按照产品的类别或用途进行分类，有绕线转子电动机、变极多速电动机、起重冶金专用电动机、电磁制动电动机、盘式制动感应电动机、齿轮减速电动机、摆线针轮减速电动机、电磁调速电动机、交流力矩电动机、振动电动机、井用潜水电动机、开关磁阻电动机、无刷永磁同步电动机、无齿轮永磁同步曳引机等。

1.2 选用原则

电机选用的原则一般是根据预期使用的目的、使用时的环境条件和运行条件及必要的要求等来选择电机的种类和规格，使所选用的电机既能满足生产工艺过程和工作机械特性的要求，又能符合工作场所的使用环境条件，同时也能够尽量考虑到整个使用系统的经济、合理、可靠、安全、节能和环保。

一般选用电动机的要点有：

1）根据机械的负载性质和生产工艺，对电动机的起动、制动、反转、调速等要求，合理选择电动机的类型。

2）根据负载转矩、转速变化范围和起动频繁程度等要求，考虑电动机的温升限制、过载能力和起动转矩，合理选择电动机的功率，使功率匹配合理，力求安全、可靠、经济。

3）根据使用场所的环境条件，如温度、湿度、灰尘、雨水、瓦斯、腐蚀及易燃易爆气体含量等，考虑必要的保护方式，选择电动机的防护结构型式。

4）根据企业电网电压标准和对功率的要求，确定电动机的电压等级。

5）根据生产机械的最高转速和对电力传动调速系统的要求，以及机械减速的复杂程度，选择电动机的额定转速。

6）选择电动机时，要考虑产品的价格、建设费用和运行费用，力求综合经济效益最好。如在干燥、洁净的场所，应尽量采用防护等级为“IP23”的电动机，因为这种电动机的价格约为同容量防护等级为“IP54”电机的70%，而且制造厂可以节约材料；对于连续运行、负载率高的负载，宜采用高效率电动机，以求节能和提高综合经济效益。

7）选择电动机时，要考虑影响安装、运行和维护的因素，力求安装和检修方便，运行可靠。

8）要贯彻国家的技术经济政策，积极采用国家明令推广的新产品，不选用已淘汰的产品（如J2、JO2、JO3系列电动机等）。

1.2.1 根据使用条件选用

（1）电源条件

常用的供电电源有直流电源和交流电源。电机额定电压按GB 156《标准电压》的规定选用。3kV以下的设备与系统的额定电压见表1.9-1。3kV及以上的电压等级最常用的有3kV、6kV。已制成的大型同步发电机则采用10.5kV、13.8kV、15.75kV、18kV、20kV等电压等级。

按GB 156的规定，选用电压等级时应满足以下要求：

1）当电机采用30V及以下，在表1.9-1所列数值之外的直流电压时，应取3的整倍数；9V以下应取1.5的整倍数。

2）当电机采用100～1000V中，表1.9-1所列数值之外的直流电压时，应在R10数系内选取。

3）运行期间交流电机端电压在额定转速时的变化不超过额定值的±10%。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1.9-1　　额　定　电　压

直　流		单相交流		三相交流	
受电设备	供电设备	受电设备	供电设备	受电设备	供电设备
1.5	1.5				
2	2	—	—		
3	3				
6	6	6	6		
12	12	12	12		
24	24	24	24		
36	36	36	36	36	36
—	—	42	42	42	42
48	48				
60	60	—	—	—	—
72	72				
—	—	100①	100①	100①	100①
110	115				
—	—	127②	133②	127②	133②
220	230	220	230	220/380	220/400
400④、440	400④、460			380/660	400/690
800③	800③	—	—	—	—
1000③	1000③				
				1140④	1200④

注　1. 电器设备和电子设备分为供电设备和受电设备两大类，受电设备的额定电压也是系统的额定电压。

2. 直流电压为平均值，交流电压为有效值。

3. 在三相交流栏下，斜线 "/" 之上为相电压，斜线 "/" 之下为线相电压；无斜线者均为线电压。

① 用于电压互感器、继电器等控制系统的电压。

② 用于矿井下、热工仪表和机床控制系统的电压。

③ 使用于单台供电的电压。

④ 只限煤矿井下及特殊场合使用的电压。

（2）环境条件

电机适应的一般环境条件是：

1）海拔不超过 1000m。

2）运行地点的环境空气最高温度随季节而变化，但不超过 40℃（如电机在海拔超过 1000m 或最高环境空气温度高于或低于 40℃的条件下使用时，应按 GB 755 的规定）。

3）环境空气最低温度为－15℃。

4）最湿月月平均最高相对湿度为 90%，同时该月月平均最低温度不高于 25℃。

当与上述条件不相符时，都应作为特殊环境条件处理，而选择有相应防护措施的电机。

1.2.2　根据电机类型选用

直流电动机通常是用于需要宽调速的场合和有特殊要求的自动控制系统中。在某些领域中，如真空冶炼和无交流电网又需要直流电源的场合，则选用直流发电机。直流电机按不同的励磁方式，可分为永磁、并励、串励、复励、稳定并励和他励等。永磁直流电动机用于自动控制系统中的执行元件或一般传动；他励、并励和稳定并励直流电动机主要用于起动转矩稍大的恒速负载；复励电动机主要用于要求很大的起动转矩、转速变化不大的负载；串励电动机用于起动转矩大、转速允许有较大变化的负载。

在现代电力工业中，除少数小型水电站和风力发电机组采用异步发电机外，多数都采用同步发电机，如汽轮发电机、燃气轮发电机、柴油发电机等。同步电动机则用于驱动功率较大的机械设备和大型船舶的推进器，或用于功率不大但转速较低的各种磨机和往复式压缩机。

永磁同步电动机也已得到广泛的推广应用，比如用于计算机及自动控制系统中的各种特种永磁微电动机、用于石油和纺织行业的高效永磁电动机、用于电动汽车的各种无刷永磁同步电动机、用于电梯的无齿轮永磁同步曳引机等。

中小型三相感应电动机具有结构简单，制造、使用和维护方便，运行可靠以及质量较轻、成本较低的优点，还可以派生各种防护型式以适应不同环境条件的需要。因此，它广泛用于工农业和其他国民经济各部门，用于拖动机床、鼓风机、水泵、压缩机、起重卷扬设备、轻工业和农业加工设备等。三相感应电动机调速性能较差，在要求有较宽的平滑调速范围的场合，如传动轧机、矿山卷扬机、大型机床等，就不如采用直流电机经济、方便，但若采用变频调速技术，其调速性能可与直流电机相媲美。三相感应电动机运行时从电网吸取无功功率，因此，对拖动球磨机、压缩机等大功率、低速运行的机械，采用同步电动机则较为合理。

交、直流伺服电机及其控制系统已广泛用于数控机床和加工中心，在一些自动生产线上、印刷机械上也已大量被采用。并且随着电力电子和数字技术的发展，直流伺服电机已被交流伺服电机逐渐取代。

小功率电机和控制微电机广泛用于驱动各种电动工具、日用电器、医疗器械、自动记录仪器、钟表、农业小型电动机械、纺织机械以及飞机、汽车、计算机、电视和无线电探测装置等设备中的各种小型运动体，有的还用作自动控制系统中的伺服元件。

控制微电机在自动控制系统和计算机装置中用作监测、放大、执行和解算元件，它们基本上分属于信号元件和功率元件两大类。信号元件用来转换信号（如旋转变压器、自整角变压器和测速发电机等）。功率元件把信号转换为输出功率（如电机扩大器）以及把电能转换为机械能（如交、直流伺服电机等）。

1.2.3　根据运行方式选用

电机的运行方式必须满足被驱动机械的运行要求，以确保驱动机械系统安全可靠的运行。选用电机的运行方式应综合考虑被驱动机械的以下方面的情况：

（1）从力学角度考虑负载的类型。

（2）机械的转矩—转速特性。

（3）机械的工作类型（如连续工作、短时工作、变负载工作或断续工作等）。

（4）机械的起动频度。

（5）负载转动惯量的大小。

（6）是否需要调速（无级调速、有级调速或恒速运行等）。

（7）机械的起动和制动方式。

（8）是否需要反转等。

1.2.4　根据额定转速选用

在频率一定时，电机的额定转速与电机的磁极极数有关，极数越多电机的额定转速越低。

汽轮发电机常采用两极，也有采用四极；水轮发电机的极数可在 4～60 极或以上的范围内选用；中小容量发电机一般选用 4～16 极；大容量发电机则选用 16～60 极。小型柴油发电机的极数常采用 4～8 极，大中型柴油发电机的极数可达 32 极。同步电动机常采用 4～12 极，最大极数可达 60 极。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

感应电动机的同步转速等级，当电源频率为50Hz时，有（r/mm）3000、1500、1000、750、600和500等；直流电动机的额定转速（r/min）等级，有3000、1500、1000、750、600、500、400、320、250、200、160、125、100、80、63、50、40、32和25等。微特电机的转速最高每分钟可达十几万转。

在选择电动机转速时，应注意以下几点：

1）应根据被驱动机械最高转速对电气传动调速系统的要求，以及机械减速的复杂程度和特性，来选择电动机的额定转速。

2）对于频繁起动、制动的断续周期工作制的机械，在选择电动机额定转速时，除保证机械所需的最高稳定工作速度之外，还应选择合适的传动比。

3）电动机经常起动、制动和反转，而过渡过程的持续时间对生产率影响不大时，除考虑初期投资外，主要应根据过渡过程能量损耗最小的条件来选择额定转速。若过渡过程的持续时间对生产率影响较大时，则以持续时间为最短的条件来选择额定转速。

2 电机运行节能

随着我国国民经济持续快速的发展，电力消费也呈现同步高速增长，然而电力能源的快速增长仍然满足不了经济高速发展的需要。电动机作为风机、水泵、压缩机、机床等各种设备的动力源，广泛应用于工业、农业、国防、交通、商业、公用设施和家用电器等各个领域。据统计，电动机的用电量在全国的总用电量中占有相当大的比重，其用电量约占工业用电量的66%，占全国总用电量的50%左右。因此，提高电动机的效率，积极推广高效率电动机或节能电动机的应用，对国民经济建设、能源节约及环境保护等有积极的促进作用。

2.1 高效率三相感应电动机

高效率三相感应电动机的总损耗一般比一般用途的基本系列电动机的总损耗下降约在20%以上。

高效率三相感应电动机在设计适宜采用导磁性能好、比损耗低的硅钢片，低谐波含量的绕组型适合轴流风扇等措施。对于年运行时间较长、负载率大于50%和要求单方向运转的场合，采用高效率电动机具有明显的节电效果。

每年所节约的电能可按照下列公式计算

$$\Delta E = \left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta_c}\right) E$$

式中，η_c为高效率电动机平均效率；η为普通电动机平均效率；E为电动机每年所耗用的电能，$\times 10^8$kW·h；ΔE为高效率电动机每年所节约的电能，$\times 10^8$kW·h。

采用高效率三相感应电动机，必然造成成本的增加，但高效率三相感应电动机效率的提高所节约的电费，足以补偿这一差价。通常，采用高效率三相感应电动机的投资回收期，可采用下式计算

$$\Delta T = \frac{\Delta C}{\left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta_c}\right) P_2 Y N}$$

式中，ΔT为投资回收期，年；ΔC为采用高效率电动机增加的所有成本费用；η_c为高效率三相感应电动机的效率，%；η为替换前原有的三相感应电动机的效率，%；P_2为高效率三相感应电动机的额定功率，kW；Y为用电价格，元/(kW·h)；N为年运行时间，h。

一般高效率三相感应电动机的年运行时间越长，投资回收期的时间越短。

2.2 高效稀土永磁同步电动机

与传统的三相交流感应电动机相比，高效稀土永磁同步电动机由稀土永磁体励磁，无需励磁电流，故功率因数高，定子电流相对较小，定子铜损耗P_{Cu1}显著地减小（一般比感应电动机可减小30%以上）。稀土永磁同步电动机以同步转速运行，转子无绕组损耗，即$P_{Cu2}=0$，通常三相感应电动机这一损耗约占总损耗的20%～30%。在转子结构设计合理的情况下，可使铁损耗较感应电机的小。稀土永磁同步电动机转子磁场波形虽然接近方波，但由于稀土永磁同步电动机的气隙δ较大，合理设计的稀土永磁同步电动机的杂散损耗也可比感应电动机小。因此，稀土永磁同步电动机的总损耗较感应电动机小，效率、功率因数较感应电动机的高。效率一般比Y系列电动机效率平均高5%～8%，可替代比它大1～2个功率等级（或一个机座号）的感应电动机。

稀土永磁同步电动机的理想应用环境是负荷率高、运行时间长的领域，如油田、纺织化纤、陶瓷玻璃等领域。油田抽油机电动机年运行时间一般超过8000h，根据油田抽油机电动机的运行特点，采用高效节能稀土永磁同步电动机，综合节能效果达50%以上。

稀土永磁同步电动机效率高、功率因数高，但成本也高，相对电动机的售价也高。所以一般用于特殊且年运行时间长的场合。

2.3 调速节能

工作流量需要变化的风机和水泵，采用调速运行的感应电动机，具有良好的节能效果。卷扬装置和提升机械在运行过程中采用调速装置，也可以节约电能。感应电动机常用的调速方式及节电效果比较见表1.9-2。一般来说，恒功率调速，不管采用哪种方式，节电甚微。恒转矩负载调速，若采用变频和变极调速，有较好的节电效果。

表1.9-2 感应电动机常用调速方式比较

调速方式	转子串电阻	定子调压	电磁离合器	液力耦合器	液粘离合器	变极	串级（次同步串级）	变频
调速方法	改变转子串电阻值	改变定子输入电压值	改变电磁离合器励磁电流	改变耦合器的供油量	改变离合器工作腔中平板间的间隙值	改变电机的极数	改变逆变器中逆变角β的数值	改变电源的频率和电压值
调速类别	调速的平滑性差	无级	无级	无级	无级	有级	调速范围小时可做到无级平滑调速	无级

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

调速方式	转子串电阻	定子调压	电磁离合器	液力耦合器	液黏离合器	变　极	串级（次同步串级）	变　频
调速范围（%）	50～100	80～100	20～97	30～97	20～100	2、3、4种转速	50～100	5～100
调速精度（%）	±2	±2	±2	±1	±1	—	±1	±0.5
节能效果	良	良	良	良	良	良	优	最优
功率因数	优	良	良	良	良	良	差	优
快速响应能力	差	快	较快	差	差	快	快	最快
控制装置	简单	较简单	较简单	较简单	较简单	简单	较复杂	复杂
投资情况	低	较低	较高	中	较低	低	中	高
对电网干扰程度	无	大	无	无	无	无	较大	有
维护保养	容易	容易	较容易	较容易	较容易	最容易	较难	容易
对老企业改造	容易	容易	视场地改造情况定	视场地改造情况定	视场地改造情况定	应更换电机	容易	容易
推荐适用的容量和电压	中小容量高、低压	小容量低压	中小容量高、低压	中大容量高、低压	中大容量高、低压	中小容量高、低压	大中容量高、低压	大中小容量高、低压
适用范围	调速范围较小，适用于绕线转子电机	适用于在较高转速范围调速	长期高速运行，短期低速运行，但不能全速运行	同左	长期高速运行，短期低速运行，可全速运行	2、3或4级调速	调速范围较小，只能单象限运行；适用于绕线转子电机	调速范围宽，适用于长期低速、或频繁起动

3　电机的保护和维护

3.1　电机的保护

当电机在非正常工况下运行时，为使电机免遭破坏和防止发生人身事故，往往采用电保护、热保护和机械保护等措施。

电机的电保护主要有欠电压、过电压、过载、断相、堵转和漏电保护。

电机配用的低压断路器都有欠电压脱扣装置，一旦电压下降至规定值以下或完全失电压时，脱扣器会自动断开主电路。新型低压断路器有自动重合闸机构，能使主电路在欠电压时自动断开，并能经0.3～1s后再自动合闸一次。如果故障依然存在，主电路会再次断开，提高了电源在供电时的可靠性。

最常用的电机过载保护器有过电流继电器和熔断器。熔断器的熔断容量一般为保护电机额定电流的4～5倍，以保证电机能顺利起动。但熔断器只能在电机或整个线路发生短路时进行保护，而不能进行一般的过电流保护，所以应采用热继电器来进行保护。热继电器具有反时限特性，且与电机的热特性很接近。电机过载时，热元件由于温度上升而使热继电器触点动作将主电路断开。继电器一般做成三极，即三相中每相都接有一个双金属片，即可作为三相过载保护，又可接成差动方式作为单相过载保护。

断相运行是电机损坏的总要故障之一，所以三相感应电动机应安装断相保护器，通过断相后电流不平衡，自动断开主电路。

目前常采用电流动作式漏电保护断路器进行漏电保护，一旦电路发生漏电，通过零序电流互感器的总磁通不为零，在互感器的二次侧产生剩余电压。此电压达到规定值时，脱扣器动作，主电路断开。

凡是由于通风不良、环境温度过高或起动次数过于频繁等原因引起的电机过热，一般采用热保护器。热保护器主要有双金属片和热敏电阻式，它们都直接被埋植在绕组和轴承中，称为装入式热保护装置。热敏元件具有正温度系数、电阻温度系数大、灵敏度高、体积小和坚固可靠等优点，所以近年来常采用由它和放大器、热继电器组成的热保护器，对电机进行热保护。

电机的机械保护主要用于过转速及过转矩保护。通常采用离心式调节器进行过转速保护；采用安全销或转差离合器进行过转矩保护。

随着电子技术的发展，电子式电动机保护器也应运而生。电子式电动机保护器已由晶体管式发展到集成电路及现代的微处理芯片厚模电路。电子式电动机保护器具有保护功能齐全、精确度高、动作灵敏、耐冲击振动、重复性好、功耗小及节能等优点。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

电子式电动机保护器一般分为断相保护、温度保护、过负荷保护、堵转保护及综合保护（多功能保护）等功能。集保护、通信、遥控于一体的智能型电子式电动机保护装置，对电动机断相、过载、短路、欠电压、过电压和漏电等故障可进行实时保护，还具有时间控制、软件自诊断、来电自恢复、故障记忆、远传报警等功能。通过配置通信接口，实现计算机联网，还具有监控、监测多台电动机同时工作等功能。

3.2 电机的维护

有效而合理的维护是确保电机安全可靠运行的重要措施。各类电机应按其重要程度，配置相应的监视仪表，对电机的电流、电压、温度、噪声和振动情况进行监视，并进行定期、定运行时间、控制性和防止性维护。

电机正常运行中的一般维护包括：

1）监视各部位的温升不超过容许限值。

2）监视电流不超过规定的额定值。

3）监视电源电压不超过规定的范围。

4）注意电机的气味、振动和噪声。

5）经常检查轴承发热、漏油情况，定期更换润滑油（脂）。

6）经常保持电机清洁，防止异物进入电机内部。

7）保持换向器表面光洁，无机械损伤和火花灼伤。

8）对有集电环的电机，应经常检查电刷与集电环的接触、电刷磨损以及火花情况。

9）检查通风系统，保证风路畅通无阻，出风口温度在容许范围内等。

3.3 电机常见故障的处理

1）感应电机常见故障的处理。感应电机常见故障和处理方法见表 1.9-3。

2）绕组故障及处理。由于绕组绝缘受潮、受热、老化以及机械应力和电磁力的反复冲击，会造成绕组损伤。特别是电机的不正常运行，如长期过载、过电压或欠电压以及多相电机断相运行，常常引起绕组损坏。在电机经常出现的故障中，绕组故障约占故障的 60%以上。

绕组故障常表现为断路、匝间短路和接地三种。绕组断路常发生在元件端部接头处或引出线附近，如直流电机电枢线圈与升高片并头套处，笼型感应电机转子导条与端环连接处。绕组断路主要是由于机械力的作用，加上端部绑扎不牢或接头处焊接不良，使该处绝缘磨损或焊点脱焊。可用兆欧表或试灯来找出断路处。对多根导线或多支路并联的线圈，则可检查各支路电阻是否平衡。绕组的端部断路或焊点脱焊一般在修复后包上绝缘带即可，其他原因造成的绕组断路，多数需要更换绕组。

绕组匝间短路包括三相交流电机的匝间短路和直流电机换向器的片间短路。匝间短路大多是由于制造、使用不当或不正常运行所造成。短路处由于局部高温，用目测法即可找到，也可用兆欧表检查相间绝缘电阻，或用专门的短路侦察器查找。直流电机换向器的片间短路可用毫伏表检查片间电压分布，注意读数是否突然变小，即可找出短路点。高压电机可用交流电桥检测绝缘介质损耗。如果短路点较易修复，则可将修复处重新绝缘，否则应更换绕组。

绕组接地是由于绝缘受潮或老化开裂、磨损，使导电部分与机壳或铁心相碰，接地点多发生在绕组伸出槽口处，可用兆欧表测绝缘电阻或用试灯检查。直流电机的电枢接地，可用测量片间压降或换向片与轴间的压降找出。绕组接地故障一般较难修复，应更换。但绕组因绝缘受潮而接地，可用干燥法来恢复绝缘性能。

3）轴承故障处理。电机轴承常见故障及处理方法见表 1.9-4。

表 1.9-3 感应电机常见故障及处理方法

故障表现	可能原因	处理方法
不能起动	1. 电源未接通	1. 检查熔断器、开关触点及电机引出线有无断路；如有则加以纠正
	2. 绕组断路或短路	2. 参见本章 3.3 第 2）节
	3. 熔断器烧断	3. 查明原因，排除故障，然后换上新熔断器
	4. 电源电压过低	4. 检查电源电压
	5. 负载过大或传动机械有故障	5. 更换功率较大的电机或减轻负载。将电机与负载分开，单独起动，如情况正常，应检查被传动机械，排除故障
	6. 控制设备接线错误或过电流限值调得过小	6. 校正接线或将过电流限值调到合适值
	7. 绕线转子起动误操作	7. 检查集电环的短路装置及起动变阻器的位置。起动时，应在线路内串接变阻器，并将短路装置断开
转速不正常	1. 电源电压太低	1. 检查输入端电源电压，予以纠正
	2. 笼型转子断条	2. 参见本章 3.3 第 2）节
	3. 绕线转子一相断路或起动变阻器接触不良	3. 查明原因，排除故障
	4. 电刷与集电环接触不良	4. 调整电刷压力，改善接触
	5. 负载阻力矩过大	5. 选用功率较大的电机或减轻负载
温升过高或冒烟	1. 过载	1. 检查负载电流，选用功率较大的电机或减轻负载
	2. 三相感应电动机单相运行	2. 检查熔断器及开关的触点，排除故障或加装单相保护装置
	3. 电压过低或接线错误	3. 检查输入电压，如三相感应电动机的 Y/△联结错误，应予改正
	4. 绕组接地或匝间短路	4. 见本章 3.3 第 2）
	5. 定子、转子相擦	5. 检查气隙，予以改正
	6. 通风不畅，环境温度过高	6. 清除积灰，采取降温措施

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

故障表现	可能原因	处理方法
运转声音不正常	1. 定子、转子相擦 2. 三相感应电动机单相运行 3. 轴承缺陷 4. 转子风叶碰壳	1. 断电再合闸，若不能起动，则可能有一相断路，检查电源或电动机，排除故障 2. 参见本章 3.3 第 3）节 3. 校正风叶
不正常的振动	1. 转子不平衡 2. 轴瓦与轴颈间隙过大或过小 3. 安装定心不正	1. 校平衡 2. 参见本章 3.3 第 3）节 3. 检查轴线，加以校正
电机绝缘电阻过低或外壳带电	1. 绕组受潮，绝缘老化，接线板有污垢或引出线碰接线盒外壳 2. 电源线与接地线接错 3. 直流电机电枢绕组槽部或端部绝缘损坏	1. 将绕组进行干燥处理，去除污垢或更换绕组。若有可能，加装漏电保护 2. 纠正接线错误 3. 用低压直流电源测量片间电压，找出接地点，排除故障
轴承过热	参见本章 3.3 第 3）节	参见本章 3.3 第 3）节
感应电机运行时，电流表指针来回摆动	1. 笼型转子断条 2. 绕线转子电机一相电刷接触不良或断路 3. 绕线转子集电环短路装置接触不良	1. 参见本章 3.3 第 2）节 2. 调整电刷压力及改善接触 3. 修理或更换短路装置

表 1.9-4　　电机轴承常见故障及处理方法

故障现象	可能原因	处理方法
滚动轴承发热和不正常杂声	1. 轴承内润滑脂过多或过少 2. 滚珠（滚柱）磨损 3. 轴承与轴配合过松（走内圈）或过紧 4. 轴承与端盖配合过松（走外圈）或过紧	1. 维持适量的润滑脂（一般为轴承室内部容积的 2/3～3/4） 2. 更换轴承 3. 过松时，可用金属喷镀或镶套筒；过紧时，则需要重新加工 4. 过松时，可用金属喷镀或镶套筒；过紧时，则需要重新加工
滑动轴承发热、漏油	1. 轴颈与轴瓦间隙太小，轴瓦研刮不好 2. 油环运转不灵活，压力润滑系统的油泵有故障，油路不畅通 3. 润滑油牌号不合适、油内有杂质 4. 油箱内油位太抬高 5. 轴承挡油盖密封不好；轴承座上下接合面间隙过大	1. 研刮轴瓦，使轴颈与轴瓦间隙合适 2. 更换新油环，排除油路系统故障，保证足够的润滑油量 3. 换用合适的润滑油量，清除杂质 4. 减少油量 5. 改进轴承档油盖的密封结构，研刮轴承座上下接合面使之密合

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

参 考 文 献

[1] 机械工程手册电机工程手册编委会. 电机工程手册. 第二版：电机卷. 北京：机械工业出版社，1996.

[2] GB 755—2000 旋转电机定额和性能. 北京：中国标准出版社，2000.

[3] 汪耕. 我国大型发电机制造技术展望. 上海电力，2005 (4)：358-362.

[4] 唐任远等著. 现代永磁电机理论与设计. 北京：机械工业出版社，1997.

[5] 江建中，傅为农. 异步电机电磁场计算的有限元模型综述. 电工技术杂志，1998，(1)：1-6.

[6] 汤蕴璆. 电机内的电磁场. 北京：科学出版社，1998.

[7] 孙玉田，杨明，李北芳. 电机动态有限元中的运动问题. 大电机技术，1997，(6)：35-39.

[8] 胡岩. 考虑饱和和运动的电机瞬态电磁场有限元计算. 沈阳工业大学学报，1996，18 (2)：38-44.

[9] 王群京，孙明施，李国丽，蒋宏波，方凯. 表面磁钢无刷直流电动机的电感计算和数字仿真研究. 电工技术学报，2001，16 (1)：21-25.

[10] 孙建中，唐任远，等. 盘式无刷式直流电动机瞬态电磁场仿真. 系统仿真学报，2001.

[11] 严登俊，韩敬东，刘瑞芳，胡敏强. 处理电磁场有限元运动问题的新方法. 中国电机工程学报，2003，23 (8)：163-167.

[12] 章跃进，江建中，屠关镇. 应用数值解析结合法计算旋转电机磁场. 电工技术学报，2004，19 (1)：7-11.

[13] 章跃进，张东. 旋转电机磁场计算中转子的自由转动. 电工技术学报，2006，21 (8)，1-4.

[14] 叶云岳，林友仰编著. 计算机辅助电机优化设计与制造. 杭州：浙江大学出版社，1998.

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第2篇 同步电机

主编单位：哈尔滨大电机研究所
哈尔滨电机厂有限责任公司
主　　编：沈梁伟　刘公直
编写人员：沈梁伟（哈尔滨大电机研究所）
孙玉田（哈尔滨大电机研究所）
刘公直（哈尔滨电机厂有限责任公司）
蒋宝刚（哈尔滨电机厂有限责任公司）
王建刚（哈尔滨电机厂有限责任公司）
张惠敏（哈尔滨电机厂有限责任公司）
张砚明（哈尔滨电机厂有限责任公司）
刘玉祥（哈尔滨电机厂有限责任公司）
徐福安（哈尔滨电机厂有限责任公司）
龚定章（上海电器科学研究所（集团）有限公司）
章月霞（上海电器科学研究所（集团）有限公司）
杨顺昌（重庆大学）
廖　勇（重庆大学）
高清飞（哈尔滨电机厂有限责任公司）
刘新天（哈尔滨电机厂有限责任公司）
杨开黎（哈尔滨电机厂有限责任公司）
赵向东（哈尔滨电机厂有限责任公司）
李志和（哈尔滨电机厂有限责任公司）
朴今淑（哈尔滨电机厂有限责任公司）
周　波（哈尔滨电机厂有限责任公司）
王树清（哈尔滨电机厂有限责任公司）
夏佑安（哈尔滨电机厂有限责任公司）
张连彬（哈尔滨电机厂有限责任公司）
富立新（哈尔滨电机厂有限责任公司）

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第1章 概 论

1 同步电机特征

同步电机是一种交流电机，其转子的转速 n（r/min）与电网频率 f（Hz）之间有着恒定的比例关系，即

$$n = \frac{60f}{p} \tag{2.1-1}$$

式中，p 为电机的极对数。

2 同步电机的基本结构型式及分类

2.1 基本结构型式

同步电机有旋转磁极（电枢固定）和旋转电枢（磁极固定）两种结构型式，如图 2.1-1 所示。通常三相同步电机的电枢绕组与三相电网连接，励磁绕组则与直流电源连接。对于高压、大中型同步电机，为了易于引出或引入电枢电流，一般都采用旋转磁极式，只有某些小型的或特殊用途的同步电机，如无刷励磁同步电机励磁系统中用的交流发电机，才采用旋转电枢式。

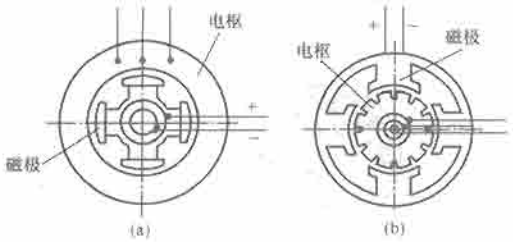
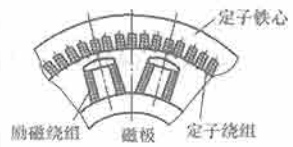
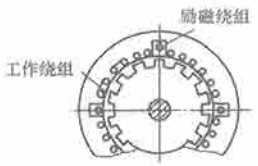
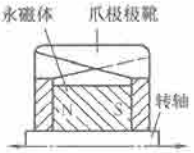


图 2.1-1 同步电机示意图
(a) 旋转磁极式；(b) 旋转电枢式

2.2 分类

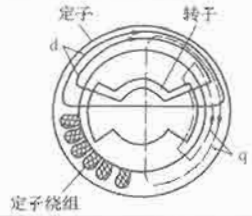
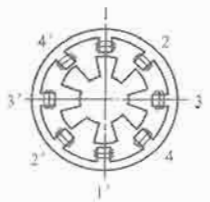
同步电机按磁路结构的分类见表 2.1-1。同步电机按原动机、运行方式以及频率等的不同还可分为汽轮发电机、水轮发电机、柴油发电机、中频发电机、同步电动机、同步调相机、发电电动机以及自动控制系统和日用电器中使用的小型和微型同步电机。

表 2.1-1 同步电机按磁路结构的分类表

磁路结构	结构示意图	特 点	用 途
凸极式		1. 转子有显露的磁极 2. 励磁绕组为集中绕组 3. 转子的磁极铁心一般不是整体的，而是叠片结构	$p \geqslant 2$ 的同步发电机和电动机
隐极式		1. 通常转子是细长呈圆柱形结构 2. 励磁绕组为同心式分布绕组 3. 转子除小型的用叠片结构外，通常都是整体的	$p \leqslant 2$ 的同步发电机和电动机
感应子式		1. 转子做成齿轮形，一个转子齿距形成一对极 2. 励磁绕组在定子上 3. 可做成单极或多极式	中频发电机（小功率的用作超高速电动机，雷达装置的特种电源；大功率的用作高频加热电源）
爪极式		1. 凸极式的一种变形，N、S 极各一组做成爪状，交替插合 2. 用永磁体或励磁绕组励磁（共用一个或两个励磁绕组） 3. 励磁绕组通常在定子上	车辆及控制用小功率电动机，高速发电机

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

磁路结构	结构示意图	特　　点	用　　途
磁阻式		1. 定子与一般交流电机的相似 2. 转子无励磁绕组，有反应槽	驱动及控制用小功率电动机、高速发电机
开关磁阻式		1. 定、转子均为凸极式，且两者极数不同 2. 定子极上绕有线圈，以构成多相绕组 3. 用改变相电流脉冲频率来改变转子转速	调速传动用小功率电动机
永磁式		1. 磁路的一部分用永磁体做成，以永磁代替直流励磁 2. 可做成凸极式或隐极式，感应子式或爪极式	中小功率发电机或电动机

3 同步电机用途

绝大多数发电厂，如现代电力工业中火力发电厂、水电站（厂）、核能发电厂均采用同步电机作发电机，由内燃机驱动的发电机也采用同步电机。

一台独立运行的同步发电机，必须向与它连接的负载提供有功功率和无功功率。然而多数同步发电机是并联到电网上运行的。由于电网的负载经常处于变动状态，根据原动机的机动能力和机组的运行经济性，在有功负载方面有一些发电机组被指定承担基本负载，长期运行；另一些发电机组承担尖峰负载，短时运行。

火电机组及核电机组宜承担基本负载。抽水蓄能电站所用的发电电动机，在电网处于高峰负载时可作为发电机运行，向电网提供电能；在电网处于低谷负载时可作为电动机运行，驱动水泵，把下游水库的水抽回上游水库，将电能转换成水的位能而储蓄备用。

在无功负载方面，除发电机供给一部分外，不足的部分主要靠连接在电网上的电容器、静止补偿器、同步调相机或作调相运行的发电机以及一些同步电动机来供给。

同步发电机的有功功率的调节，由原动机的调速器根据转速的变化，调节机械通过输入来实现。无功功率，则通过励磁系统，调节发电机的励磁电流来控制。

同步电机还可用作电动机，以恒速或变频调速方式驱动功率较大的机械设备，如轧钢机、透平压缩机、鼓风机、泵和变流机组；或者用于驱动功率虽不大，但转速较低的各种磨机和往复式压缩机；还可用于驱动大型船舶的推进器等。各种不同电励磁的小型和微型同步电动机，因其结构较简单，运行稳定，也被广泛用于要求转速恒定的或变频调速的日用电器装置和自动控制系统中（参见第5篇第3章、第4章、第5章）。

与异步电动机相比，同步电动机可通过调节励磁电流来改善自身的和电网的功率因数，提高稳定性，使发电站装机容量充分得到利用。

同步电动机的主要运行性能必须满足被驱动机械的要求（例如，轧钢机需要较大的过载能力，磨机需要较大的起动转矩，往复式机械需要足够的飞轮力矩等）和节能、保护、环境、安全等方面提出的要求。

此外，对变频调速的同步电动机，其参数的选择、运行特性和结构等还应满足控制系统、电力转换装置、起动等提出的要求。

同步电机还可作为同步调相机（一种接在交流电网上，不带任何机械负载而空转的同步电动机），向电网输出电感性的或电容性的无功功率，以改善电网的电能品质。

综上可知，同步电机在国民经济中具有十分重要的地位和作用。

4 同步电机发展趋势

常规产品不断改进、不断延长现有机组的使用寿命与新产品开发永远是两条平行线。而这两条平行线的动力就是市场。降低投资、提高效率、提高运行可靠性、延长产品可靠使用寿命、加强环境保护是市场的需求，也是评价产品的准则。

同步电机的发展包括两个方面：一方面是依靠科技进步渐进式发展；另一方面是依靠创新，试图跨越式发展。

（1）渐进式发展与现代科技成果同步成长

这种发展模式是直接应用现代科技进步成果，使同步电机在增大单机容量、扩大品种、提高可靠性、经济性和适应性方面得到发展。举例来说材料工业进步为同步电机提供了尺寸及性能均满足要求的铸锻件、硅钢片、各种绝缘材料、工业电子器件等。计算机快速进步使同步电机电磁场、瞬态场、定转子动力学、温度场、应力场等的计算更加精确到位。电子工业发展改进了同步电机的励磁系统，并开发出各种在线监测技术。通信技术发展更提高了同步电机自动化水平。这种发展模式的优点是与时俱进，风险较小，永远不会停止。

（2）依靠理念创新试图跨越式发展

这种发展模式科研投入较大，从科研转化为产品时间较长，风险也较大，优点是只要成功，突破力度大可实现跨越

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式发展。下面列举在过去20年内的探索。

1）超导发电机开发。日本在20世纪80年代初出于对超导电器的预测，认为这可能是21世纪电工行业的突破口，因此搞了一个投资庞大的研究计划，按此计划组织行业力量，1997年已完成70MW级模型超导发电机开发并投入电站试运行，接下来将开发200MW超导发电机。从大量试验和并网运行证明超导发电机具有体积小、效率高、运行稳定性好的特点。超导发电机定子采用无槽气隙绕组，转子槽内放置多股细线绞合的超导励磁线圈，转子中心孔通入液氦以保持转子绕组处于低温超导状态。由于该机组结构复杂，又有一套庞大的冷凝系统为超导发电机提供低温液氦，因此，投资过高，加之市场需求不紧迫，低温超导发电机很难进入市场。超导发电机的实用化要寄希望于高温超导材料的应用。

2）蒸发冷却发电机的研发。中国在蒸发冷却电机的研发进程中走过了半个世纪，先后开发了10MW、50MW、400MW蒸发冷却水轮发电机并研制运行了50MW汽轮发电机。鉴于上述机组成功运行并有温升低、免维修、可靠性高等优点，现计划将蒸发冷却技术推广到700MW三峡发电机和300MW、600MW透平发电机中去并正在积极组织实施。随着冷却介质创新解决了对环保疑虑，将蒸发冷却技术应用到大机组以代替定子绕组水内冷技术会带来显著好处，解决了定子内冷水漏、堵所产生的事故从而提高了运行可靠性。现有经验表明，蒸发冷却发电机的制造成本、运行成本低于定子水内冷发电机，经济性很有吸引力。

立式水轮发电机蒸发冷却技术利用吸热量及流体密度的变化，形成了自循环，不需要外加动力，就可使流体介质在全密封的冷却系统内循环，实现了电机自行冷却的目标。

汽轮发电机定子蒸发冷却结构有管内冷（即液体在导体内部循环）与全浸式（液体在绕组外循环）两种。全浸式用隔离套筒将定转子分开，定子绕组和铁心浸泡在蒸发冷却介质中，更有恒温、防电晕无局部放电、自行循环的优点。管内冷需要压缩机作为冷却介质循环的动力。

3）交流励磁变速恒频发电机。由日本开发的交流励磁变速恒频水轮发电机优点很多，引人瞩目。用变频器向转子三相绕组供给一个低频（±5～10Hz）交流正弦电流，定子侧按电网速度 n_1 恒定，它等于转子机械频率 n_r 和转子旋转磁场频率 n_2 的和，$n_1=n_r+n_2$，改变转子电流频率就能自动改变转子的转速。转速可变的抽水蓄能发电站有明显的下列优点：

①抽水蓄能运行时，可调节有功功率和无功功率。

②泵的最优转速比水轮机工况下略高，改变转速可在两种工况下提高效率2.5%～4.5%。

③扩大了部分负载的运行范围，当水头和流量离最优运行点偏差较大时，改变转速能跟踪最优工况。

④提高了系统稳定性，发电机不会失步。

⑤适当选择转子侧变频器的容量（一般要大于发电机额定功率三分之一）可代替水泵运行时的起动装置。

变速恒频发电机设计研制有相当难度，如转子采用低频交流励磁后，如何抵制定子电压谐波，调速过程如何又快又稳，转子绕组固定、大电流高压集电环结构、转子过电压过电流保护等。日立制造的395MW发电/电动机在大河内电站运行已达10年，证明该项技术是成熟的。至于经济问题，根据大河内经验，可变速发电机的价格为常规发电机价格的1.65倍。因此是否选用调速机组要由经济分析来决定，至少单机容量在200MW以上才有可能。

4）高压电机。国外利用集成概念对系统进行了优化，历时8年开发出高压电机。可用在水、火电上，用在风力发电上，用在电动机上。

高压发电机的转子不论是水轮发电机或透平发电机都与常规电机一样，高压发电机用空气冷却，定子铁心用不锈钢管通水冷却。定子绕组与常规电机不同，采用电缆绕制的集中绕组。每根电缆长约100m，用标准的电缆接头连接，当前交联聚乙烯的耐压水平已超过了500kV。高压发电机有两大突破，一是用圆形电缆使电场分布均匀，提高电压不易击穿，取消了发电机出口开关、封闭母线，升压变压器可直接上网简化了系统。二是避免了因定子大电流引起的冷却、绕组振动、焊接困难等问题。经过75MVA、155kV水电，42MVA、136kV火电的运行，高压发电机已进入商业化轨道，据此ABB提出的高压发电机应用范围是水电容量20～800MW、电压25～245kV；火电容量40～200MW、电压30～150kV。高压风力发电机采用同步机，定子绕组由电缆绕成，额定电压20kV，转子为永磁钢（PMG）取消了常规齿轮变速箱，使之维护工作量减少。频率随风速而变的高压交流电经整流变成直流电，由直流电缆传送减少了损耗，输送到逆变器逆变成所需频率的交流电，经系统变压器升压后并网，一个单元包括若干个风力发电机组，每台为3MW，一组的容量为40MW。

以往用于驱动压缩机和泵类的工业机械所使用的大型电动机，其功率范围在1000～5000kW之间，电压在3～15kV之间。由于输电线路的电压比上述额定电压要高得多，所以在电网和电动机之间必须安装一个或多个降压变压器。这些变压器不仅需要一大笔费用，并且存在引发火灾和漏油之类的多种危险。高压电动机不需要使用降压变压器，可直接接到高压电网。在高压电动机中如同高压发电机一样，使用交联聚乙烯电缆制成定子绕组，额定电压有35kV、66kV、150kV，其他部件如转子、机座等均无变动。高压电动机采用直接在线起动方法，起动电流为2～5倍的额定电流，在电动机不产生过热的前提下，通过对机械转矩和电网压降的优化，确定电动机的合适参数。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第2章 同步电机的基本原理

1 稳态数学模型

同步电机的定子由多相对称交流绕组和铁心构成。多相对称交流绕组在通以多相对称的交流电流时，将形成一个空间正弦分布的行波磁场。同步电机的运动部分由产生静止磁场的磁极和支撑部分构成。运动部分的磁极通常分为直流绕组馈电的电励磁结构和永久磁铁建立磁场的永磁结构两种型式。根据同步电机运动部分的运动方式不同（平移运动和旋转运动），同步电机又可分为直线同步电机和旋转同步电机两种型式。本章的分析只针对后者，即旋转同步电机进行。

在多相同步电机中，三相同步电机最为常用，故本章重点介绍三相同步电机的基本原理。其他对称交流绕组同步电机的分析十分类似。

三相同步电机的三个电枢绕组分别以 A、B、C 表示，三个绕组的中心轴线彼此在空间上成120°（电角度）交角。转子上磁极的中心线定义为直轴（又称 d 轴），极间中心线定义为交轴（又称 q 轴）。

由于同步电机转子的磁场是静止磁场，在稳态运行时，为了使定子、转子磁场保持同步运行，同步电机的转子将与定子的旋转磁场同步运行。

1.1 磁动势和电动势

1.1.1 隐极同步电机的磁动势和电动势

电机的绕组中通以电流时将产生磁动势。只考虑基波分量时，同步电机的气隙磁动势 $\dot{F}_\delta$ 可以分解成转子励磁磁动势 $\dot{F}_{f1}$ 和定子的电枢反应磁动势 $\dot{F}_a$，并满足

$$\dot{F}_a + \dot{F}_{f1} = \dot{F}_\delta \tag{2.2-1}$$

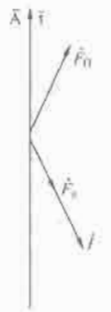


图 2.2-1 时空相量图

式中，$\dot{F}_{f1}=K_{f1}\dot{F}_f$，$\dot{F}_f$ 为励磁磁动势的峰值，K_{f1} 为磁场中基波磁通密度的幅值系数，K_{f1} 的计算参见第1篇第2章4节。

若将电枢空间轴（一般取 A 相相轴 $\bar{A}$）与时间轴 $\bar{t}$ 重合，将电流 $\dot{I}$ 和电枢反应磁动势 $\dot{F}_a$ 相重合，并均以同步转速旋转，从而构成如图 2.2-1 所示的时空相量图。

当采用发电机参考方向时，同步电机的电动势方程为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + \mathrm{j}\dot{I}X_t \tag{2.2-2}$$

式中，X_t 为隐极同步电机的同步电抗。

$$X_t = X_\sigma + X_a$$

隐极同步电机的电动势—磁动势相量图如图 2.2-2 所示。

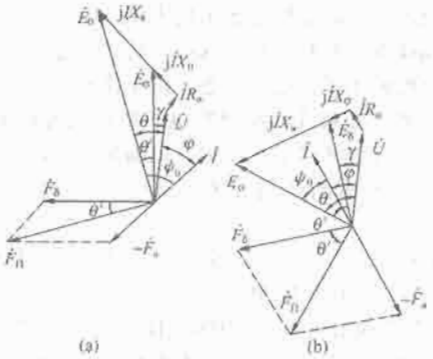


图 2.2-2 隐极同步发电机的电动势—磁动势相量图

(a) $\dot{I}$ 滞后于 $\dot{U}$；(b) $\dot{I}$ 超前于 $\dot{U}$

1.1.2 凸极同步电机的磁动势和电动势

由于凸极同步电机的气隙是不均匀的，为分析方便，需将电枢电流 I 和电枢反应磁动势 F_a 分解为直轴和交轴两个分量，如图 2.2-3 所示。

$$\left.\begin{aligned} I_d &= I\sin\psi_0 \\ I_q &= I\cos\psi_0 \end{aligned}\right\} \tag{2.2-3}$$

$$\left.\begin{aligned} F_{ad} &= F_a\sin\psi_0 \\ F_{aq} &= F_a\cos\psi_0 \end{aligned}\right\} \tag{2.2-4}$$

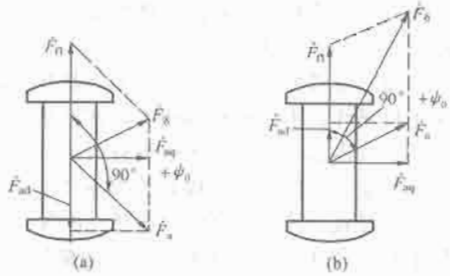


图 2.2-3 磁动势空间相量及电枢反应磁动势的分解

(a) $\psi_0>0$；(b) $\psi_0<0$

当 ψ_0 为正时，$\dot{F}_{ad}$ 对励磁磁动势起去磁作用；$\dot{F}_{aq}$ 起交磁作用，表现为发电机状态时，对前极边去磁，对后极边助磁；在电动机状态时，则对前极边助磁，而对后极边去磁。

磁动势平衡方程和电动势平衡方程为

$$\dot{F}_{ad} + \dot{F}_{aq} + \dot{F}_{f1} = \dot{F}_\delta \tag{2.2-5}$$

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + \mathrm{j}\dot{I}_d X_d + \mathrm{j}\dot{I}_q X_q \tag{2.2-6}$$

对应凸极同步发电机的电动势—磁动势相量图如图 2.2-4 所示。

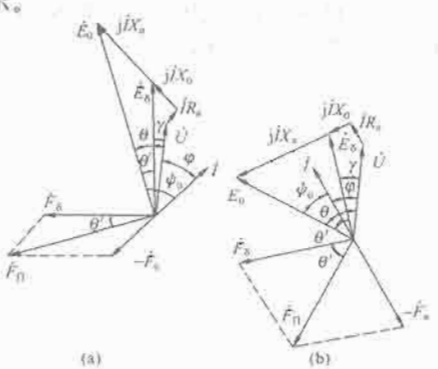


图 2.2-4 凸极同步发电机的电动势—磁动势相量图

(a) $\dot{I}$ 滞后于 $\dot{U}$；(b) $\dot{I}$ 超前于 $\dot{U}$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

图中 φ 为功率因数角；θ' 为内电动势 $\dot{E}_\delta$ 与励磁电动势 $\dot{E}_0$ 之间的相位差角，也就是 $\dot{F}_\delta$ 与 $\dot{F}_{f1}$ 在空间上的相位差角，θ' 的大小决定了电磁功率的大小；ψ_0 为 E_0 和 I 之间的相位差角，称为内功率因数角。

$$\left.\begin{aligned}\psi_0 &= \arctan\frac{U\sin\varphi + IX_q}{U\cos\varphi + IR_a}\ (\text{凸极极})\\ \psi_0 &= \arctan\frac{U\sin\varphi + IX_t}{U\cos\varphi + IR_a}\ (\text{隐极机})\end{aligned}\right\} \tag{2.2-7}$$

1.1.3　电枢绕组的反电动势

电枢绕组的各种电抗压降也可以表示成相应的反电动势。反电动势的计算方法及其与电抗压降的对应关系见表 2.2-1。

1.2　电枢反应磁动势的折算

上述磁动势平衡关系还不能直接被用来计算负载下的励磁磁动势或励磁电流。为了确定励磁电流，必须将电枢反应磁动势折算到转子一侧。

1.2.1　折算原则及折算系数

任一大小的电枢反应磁动势可以折算为与其等效的励磁磁动势。折算的原则是：折算前后的磁动势在定子绕组中感生的基波电动势是相等的，即电枢反应磁动势产生的基波磁通密度和等效的励磁磁动势产生的基波磁通密度应等值。其折算公式及折算系数见表 2.2-2。

表 2.2-1　　电枢绕组中的感应电动势

电动势名称	表　达　式	以电抗压降的形式表示	说　　明
励磁电动势 E_0	$E_0=4.44fNK_{dp1}\Phi_0$	—	由励磁磁动势 F_f 在气隙内建立的基波磁通 Φ_0 所感生
电枢反应电动势 E_a	$E_a=4.44fNK_{dp1}\Phi_a$	$\dot{E}_a=-\mathrm{j}\dot{I}X_a$	隐极电机中由电枢反应磁通 Φ_a 所感生，X_a 称为电枢反应电抗
电枢漏磁通电动势 E_σ	$E_\sigma\approx4.44fN\Phi_{\sigma a}$	$\dot{E}_\sigma=-\mathrm{j}\dot{I}X_\sigma$ $=-\mathrm{j}(\dot{I}_d+\dot{I}_q)X_\sigma$	由电枢电流建立的漏磁通 $\Phi_{\sigma a}$（包括槽漏磁通、谐波漏磁通和端部漏磁通）所感生，X_σ 称为漏电抗
直轴电枢反应电动势 E_{ad}	$E_{ad}=4.44fNK_{dp1}\Phi_{ad1}$	$\dot{E}_{ad}=-\mathrm{j}\dot{I}_dX_{ad}$	由 F_{ad} 建立的 B_{ad1} 所对应的 Φ_{ad1} 感生，X_{ad} 称为直轴电枢反应电抗，I_d 见式（2.2-3）
交轴电枢反应电动势 E_{aq}	$E_{aq}=4.44fNK_{dp1}\Phi_{aq1}$	$\dot{E}_{aq}=-\mathrm{j}\dot{I}_qX_{aq}$	由 F_{aq} 建立的 B_{aq1} 所对应的 Φ_{aq1} 感生，X_{aq} 称为交轴电枢反应电抗，I_q 见式（2.2-3）

注　N—定子绕组每相串联匝数；K_{dp1}—定子绕组的基波绕组系数。

表 2.2-2　　电枢反应磁动势的折算公式及折算系数

	按折算原则所得的关系	折算为励磁磁动势的值	折　算　系　数
隐极电机	$K_{f1}F'_a=F_a$	$F'_a=k_aF_a$	$k_a=1/K_{f1}$
凸极电机	$K_{f1}F'_{ad}=K_dF_{ad}$	$F'_{ad}=K_{ad}F_{ad}$	$K_{ad}=K_d/K_{f1}$
	$K_{f1}F'_{aq}=K_qF_{aq}$	$F'_{aq}=K_{aq}F_{aq}$	$K_{aq}=K_q/K_{f1}$

注　表中 $K_{f1}=B_{f1}/B_f$，为磁场中基波磁通密度的幅值系数，对凸极电机 $K_{f1}=AB$（参见第 1 篇第 2 章 4 节），对隐极电机 $K_{f1}=8\sin(\pi\gamma/2)/(\pi^2\gamma)$，$\gamma$ 为转子嵌线槽数对槽分度数的比，K_d、K_q 如图 2.2-6 所示。

1.2.2　电枢反应磁场基波幅值系数

当电机磁路处于不饱和状态时，凸极电机的电枢反应磁动势在气隙内建立的磁通密度波形如图 2.2-5 所示。

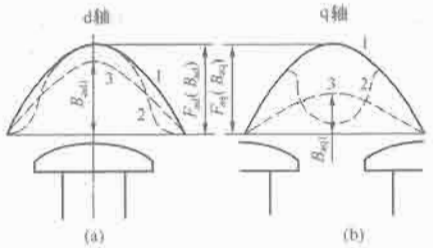


图 2.2-5　凸极电动机电枢反应磁通密度
（a）直轴；（b）交轴

图中 $B_{ad1}=K_dB_{ad}$，$B_{aq1}=K_qB_{aq}$，但 B_{aq} 并非实际磁通密度曲线的幅值，而是假想幅值，其值为 $B_{aq}=\mu_0F_{aq}/\delta$。$K_d$、$K_q$ 是从电枢反应磁通密度波形用傅里叶级数分解所得的基波幅值系数，其值如图 2.2-6 所示。

当忽略磁路饱和及齿槽效应时，隐极电机的电枢反应磁动势在气隙内建立的磁通密度波形十分接近正弦波，故隐极电机的电枢反应磁动势一般不加折算。

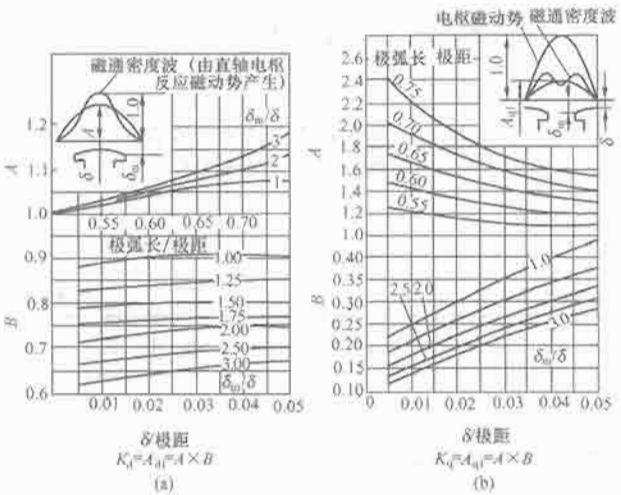


图 2.2-6　电枢反应磁通密度基波幅值系数
（a）直轴；（b）交轴

1.3　磁路饱和时的电动势方程

考虑铁磁材料磁化过程的非线性，电机运行时磁路将出现饱和。饱和情况下电机的气隙磁场分布将发生畸变。对同步电

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

机的运行而言，不同的运行工况具有不同的磁场饱和特点。因此，对于确定的运行条件，应根据同步电机的端口条件（U、I 和 $\cos\varphi$）计算其饱和磁场分布，然后进行相应的分析。

磁路饱和时的电动势平衡方程为

$$\dot{E}_\delta = \dot{U} + \dot{I}(R_a + jX_p) \tag{2.2-8}$$

式中，$\dot{E}_\delta$ 为气隙合成磁场中基波分量在电枢绕组中感生的内电动势；X_p 为保梯电抗，参见本章 3.1 节及表 2.2-18。

磁路饱和时的电抗值是以额定电压所对应的饱和度来进行计算的。首先根据式（2.2-8）算出 $\dot{E}_\delta$，根据电机的空载特性曲线 $E=f(F)$，在纵坐标上以 E_δ 值作水平线，得实际运行点 A，将 A 与原点 O 相连得直线 $\overline{OA}$，然后在直线 $\overline{OA}$ 上查取各种磁动势值在此饱和度下对应的各种电动势。

1）隐极电机饱和同步电抗的计算。由已知电枢电流 I 确定电枢反应磁动势 F_a 及其折算值 K_aF_a。从图 2.2-7（a）上，根据 K_aF_a 在直线 $\overline{OA}$ 上可查得 E_a，则隐极同步电机的饱和同步电抗为

$$X_t = X_\sigma + \frac{E_a}{I} \tag{2.2-9}$$

2）凸极电机饱和同步电抗的计算。已知电枢反应磁动势 F_a 及内功率角 φ_0 的初值，可算出交、直轴电枢反应磁动势的折算值的初值

$$K_{aq}F_{aq} = K_{aq}F_a\cos\varphi_0$$
$$K_{ad}F_{ad} = K_{ad}F_a\sin\varphi_0$$

从图 2.2-7（b）上按 $K_{aq}F_{aq}$ 和 $K_{ad}F_{ad}$ 的值在直线 $\overline{OA}$ 上可查得 E_{aq} 和 E_{ad} 的初值，于是凸极同步电机的饱和电抗为

$$\left.\begin{aligned} X_q &= X_\sigma + \frac{E_{aq}}{I_q} \\ X_d &= X_\sigma + \frac{E_{ad}}{I_d} \end{aligned}\right\} \tag{2.2-10}$$

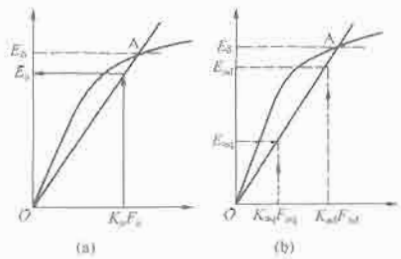


图 2.2-7 饱和时各电动势值的求取
（a）隐极电机；（b）凸极电机

把算得的 X_q 代回式（2.2-7）中，计算出考虑饱和影响之后的 φ_0，把 φ_0 的新值与 φ_0 的初值进行比较。如果其差值足够小，则计算结束，否则重新设定 φ_0 重算，最后得到同步电抗的终值。

1.4 电动机电动势方程

同步电动机是电网的负载，按习惯，电动机电流参考正方向与发电机电流的相反。电动机的 $\dot{E}_0$ 对电网而言是反电动势，故同步电动机的电动势平衡方程为

$$\dot{U}_c = \dot{E}_0 + \dot{I}R_a + jI_dX_d + jI_qX_q \tag{2.2-11}$$

根据式（2.2-11）可画出同步电动机的相量图，如图 2.2-8 所示。

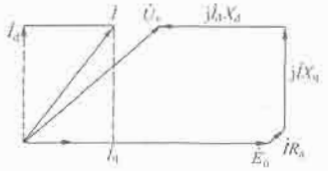


图 2.2-8 同步电动机相量图（过励）

通常电网的其他绝大多数负载都是感性的，所以同步电机常处于正常励磁或过励磁的情况下运行，以改善电网的功率因数。

2 电磁功率和稳定性

2.1 电磁功率和电磁转矩

2.1.1 电磁功率

同步电机的电磁功率指电机中通过气隙磁场所实现的机电能量转换所传递的功率。对发电机，电磁功率是指由转轴上机械功率所转换过来的电磁功率；对电动机，电磁功率是指转换成机械功率的那一部分电磁功率。电磁功率也称为内功率或计算功率，可用下式表示

$$P_{em} = mUI\cos\varphi + mI^2R_a（发电机）\tag{2.2-12}$$

$$P_{em} = mUI\cos\varphi - mI^2R_a（电动机）\tag{2.2-13}$$

2.1.2 功角特性和电磁转矩

由式（2.2-12）或式（2.2-13），并根据图 2.2-2 或图 2.2-4 可得表 2.2-3 中的 P_{em} 的表达式，按此表达式作出 $P_{em}=f(\theta)$ 或 $P_{em}=f(\theta')$，称为功角特性，如图 2.2-9 所示。

同步电机的电磁转矩是指对应于电磁功率的轴转矩。电磁转矩 $T_{em}=P_{em}/\Omega_1$，式中，Ω_1 为同步机械角速度（rad/s）。

表 2.2-3 电磁功率与电磁转矩

	隐极电机	凸极电机
不计定子绕组电阻时（即 $R_a=0$）	$P_{em}=m\dfrac{E_0U}{X_t}\sin\theta$ $T_{em}=\dfrac{m}{\Omega_1}\dfrac{E_0U}{X_t}\sin\theta$	$P_{em}=m\dfrac{E_0U}{X_d}\sin\theta+\dfrac{mU^2}{2X_dX_q}(X_d-X_q)\sin2\theta$ $T_{em}=\dfrac{m}{\Omega_1}\dfrac{E_0U}{X_d}\sin\theta+\dfrac{m}{\Omega_1}\dfrac{U^2}{2X_dX_q}(X_d-X_q)\sin2\theta$
计及定子绕组电阻时	$P_{em}=m\dfrac{E_0E_\delta}{X_s}\sin\theta'$ $T_{em}=\dfrac{m}{\Omega_1}\dfrac{E_0E_\delta}{X_s}\sin\theta'$	$P_{em}=m\dfrac{E_0E_\delta}{X_{ad}}\sin\theta'+\dfrac{mE_\delta^2}{2X_{ad}X_{aq}}(X_{ad}-X_{aq})\sin2\theta'$ $T_{em}=\dfrac{m}{\Omega_1}\dfrac{E_0E_\delta}{X_{ad}}\sin\theta'+\dfrac{m}{\Omega_1}\dfrac{E_\delta^2}{2X_{ad}X_{aq}}(X_{ad}-X_{aq})\sin2\theta'$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

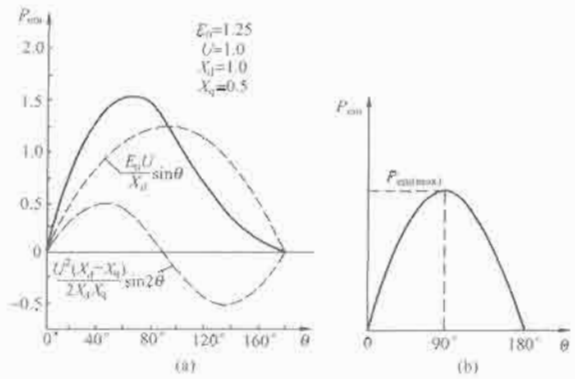


图 2.2-9　功角特性

(a) 凸极电机；(b) 隐极电机

1) 功角 θ' 为 E_0 与 E_δ 之间的时间相位差角。从空间意义上，θ' 也就是气隙合成磁场基波分量的轴线与磁极轴线在空间的相位差角（电角度）。θ' 为正值时表示励磁磁场超前于气隙合成磁场，电磁转矩是制动的，电机处于发电机运行状态。θ' 为负值时，表示励磁磁场滞后于气隙合成磁场，电磁转矩是驱动的，电机处于电动机运行状态。通常定子电阻可以略去不计，因此，把 E_0 与 U 之间的相位角 θ 称为功角或功率角。

2) 凸极电机的电磁转矩有两个分量。表 2.2-3 中公式右边的第一项为基本分量，需要励磁磁场才能产生；第二项为附加分量，是交、直轴磁阻不等引起的，又称为磁阻功率（转矩），它不依赖于励磁而存在，只要 $X_d \neq X_q$，且电机定子接上外电压 U 即能产生，所以凸极电机接在电网上时，即使不加励磁，也可以输出一些功率。利用这一功率产生的转矩可制成一种磁阻式同步电动机（参见第 5 篇第 3 章 3.2 节）。

2.2　静态稳定

2.2.1　整步功率

电磁功率对其相应功角 θ 的导数，称为整步功率，即

$$P_{syn}=\frac{dP_{em}}{d\theta}=m\frac{E_0U}{X_d}\cos\theta+m\frac{U^2}{X_dX_q}(X_d-X_q)\cos2\theta \qquad (2.2\text{-}14)$$

2.2.2　静态稳定条件

当同步电机受到微小的外部干扰后，具有恢复到原来状态的能力，则称为静态稳定的，其条件为

$$\frac{dP_{em}}{d\theta}>0 \qquad (2.2\text{-}15)$$

$dP_{em}/d\theta=0$ 处是静态稳定极限。对隐极电机，稳定极限在 $\theta=90°$ 处，静态稳定的范围为 $0°<\theta<90°$；而对凸极电机，稳定区为 $0<\theta<\theta_m$，$\theta_m<90°$。

2.2.3　静过载系数与短路比

最大电磁功率 P_{emmax} 与额定电磁功率 P_{emN} 之比，称为静过载系数 K_M。

对隐极电机或凸极电机

$$K_M=K_c\frac{I_{fN}}{I_{f0}}\frac{1}{\cos\varphi_N}$$

$$K_c=\frac{\text{空载额定电压时的励磁电流}}{\text{三相稳态短路电流为额定值时的励磁电流}}=\frac{I_{f0}}{I_{fk}}=k_{\mu N}\frac{1}{X_d^*} \qquad (2.2\text{-}16)$$

式中，I_{fN} 为额定工况时的励磁电流；I_{f0} 为空载额定电压时的励磁电流；$\cos\varphi_N$ 为额定功率因数；K_c 为短路比；$k_{\mu N}$ 为空载额定电压时的饱和系数，其值为励磁总安匝与气隙安匝的比值；X_d^* 为直轴同步电抗的不饱和值的标么值。

当电机采用较大的气隙时，I_{f0} 增大，则短路比 K_c 和静过载系数 K_M 均增大，静态稳定性高。当发电机投入空载高压长距离输电系统时，在一定励磁方式所能提供的最低稳定电压条件下，发电机能承担较大的充电容量，但电机的制造成本也随之增高。如果电机主要尺寸不变，又要输出相同功率，则转子励磁绕组的温升将升高。

目前发电机大多采用快速励磁系统，已不单纯从短路比来考虑静态稳定性范围。

2.3　动态稳定概念

在系统动态干扰下，电机维持其稳定运转的能力，称为动态稳定性。

判断发电机能否在动态情况下继续稳定运行，通常采用所谓面积法。即当系统扰动使电压下降，或者由于甩负荷或切除线路使电机外电路的总阻抗增加，在这些情况下，电机的运行点将总是使功角特性从原来的曲线Ⅰ变为曲线Ⅱ，如图 2.2-10 所示。如果电机原来运行于特性Ⅰ上的 a 点，则在受到干扰后，电机的运行点将相应地转移到特性Ⅱ的 b 点。由于原动机调速器具有惯性，其延迟动作将使发电机的电磁功率 P_{em} 趋于保持为 P_0，但因运行于特性Ⅱ时，电机只能输出功率 P_0'，出现了过剩功率 ΔP。这就使转子加速，功角增大，达到 c 点（功角为 θ_c），这时 $\Delta P=0$，转子相对角速度达到最大。由于惯性的作用，电机功角会继续增大到点 θ_c'，使电机输出功率大于其输入功率，ΔP 变为负值，使转子开始减速。经过几个振荡周期后，功角稳定于 θ_c。面积 A_{abc} 称为加速面积，A_{cde} 称为减速面积。动态稳定的条件是：减速面积必须大于加速面积，否则会出现动态不稳定。减速面积与加速面积之比，称为动态稳定储备系数。

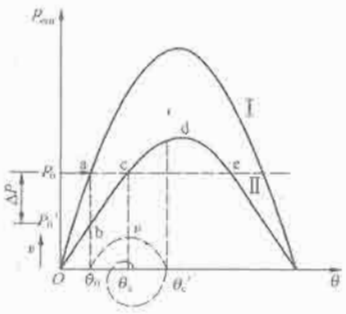


图 2.2-10　动态稳定性分析

在瞬态情况下，电机电磁功率公式中的 E_0 和 X_d 都应采用瞬态值（因超瞬态阶段的时间极短），即此时，$P_{em}'=mE_0'U\sin\theta/X_d'$。

由于 E_0' 下降不多，而 X_d' 比 X_d 小很多，如果电网电压不因突加负载或发生短路故障而下降，且所述情况发生于离电机出线端不远处，$P_{em}'>P_{em}$（θ 相同时），动态功角特性反而高于静态功角特性。实际上，发生动态情况时，电网电压一般大幅度下降。此外，故障又通常出现于升压变压器之外，因此，必须采取一定措施，以保持动态功角特性使之不过分低于静态特性。

增大减速面积或减小加速面积以提高动态稳定性的主要措施有：①设计电机时适当降低电机的 X_d'；②运行中出现类似的情况时进行强行励磁；③迅速切除故障线路。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3 运行

3.1 发电机运行特性

同步发电机的运行特性见表 2.2-4 所列出的五种，这些特性分别如图 2.2-11 所示。

在不饱和段的空载特性与零功率因数负载特性之间存在着一个电抗三角形△abc 的关系。其两个直角边分别为

$$\overline{bc} = K_{ad}F_\delta(\varphi_0 = 90°, F_{ad} = F_\delta)$$

$$\overline{ab} = IX_\sigma$$

感性负载时，对应于内电动势 E_δ 的磁化曲线不同于空载特性曲线，这是由于转子电流增大后，转子漏磁增加，转子铁磁部分的磁压降增加，故在相同的 E_δ 值下对应的励磁电流比从空载特性曲线上查得的要大。如果仍想利用空载特性曲线，则对 E_δ 计算中用到的漏电抗应该进行修正。

表 2.2-4 同步发电机的运行特性

名　　称	条　　件	特 性 曲 线
空载特性 $U_0=f(I_f)$	$n=n_N$，$I=0$	见图 2.2-11 (a)
负载特性 $U=f(I_f)$	$n=n_N$，$I=I_N$，$\cos\varphi=$常数	见图 2.2-11 (a)
稳态短路特性 $I_k=f(I_f)$	$n=n_N$，$U=0$	见图 2.2-11 (a)
调整特性 $I_f=f(I)$	$n=n_N$，$U=U_N$，$\cos\varphi=$常数	见图 2.2-11 (b)
外特性 $U=f(I)$	$n=n_N$，$I_f=$常数，$\cos\varphi=$常数	见图 2.2-11 (c)

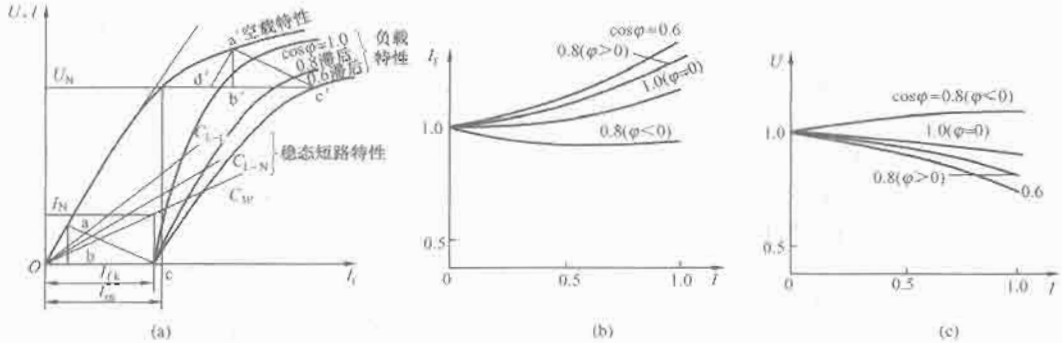


图 2.2-11 同步发电机的运行特性

(a) 空载、稳态短路及负载运行特性；(b) 调整特性；(c) 外特性

C_{3P}—稳态三相短路特性；$C_{L\text{-}L}$—稳态线—线间短路特性；$C_{L\text{-}N}$—稳态线—中点间的短路特性

若图 2.2-11 的零功率因数负载特性曲线 cc′是试验值，则在电机磁路的饱和段内，空载特性曲线与零功率因数负载特性曲线之间也必然有一个考虑饱和影响之后的电抗三角形。具体做法为，已知零功率因数负载特性曲线上的 c′点，过点 c′作水平线，在此线上取线段 b′c′=bc，自 b′向上作垂线交空载特性曲线得点 a′，a′b′所对应的压降为 IX_p，所构成的三角形△a′b′c′称为保梯三角形，X_p 称为保梯电抗，$X_p>X_\sigma$。

以上是用试验和作图法得到 X_p。也可用经验计算公式来得到 X_p。对于凸极电机，$X_p\approx0.8X_d'$；对于汽轮发电机，$X_p\approx X_d''$。

3.2 额定励磁电流的确定

额定励磁电流可用作图法确定，如图 2.2-12 所示。其方法是：

1) 以 I_f 为横轴作空载特性曲线，沿纵轴作额定电压相量 $\dot U_N$。

2) 自原点 O 作额定电枢电流相量 $\dot I_N$，与纵轴成 φ_N（$\cos\varphi_N$ 为额定功率因数）。

3) 从相量 $\dot U_N$ 终端作电枢绕组电阻压降相量 $\dot I_N R_a$ 平行于相量 $\dot I_N$，R_a 为基准工作温度时的绕组电阻（大中型电机的电枢绕组电阻压降可忽略不计），从 $\dot I_N R_a$ 的终端作一垂直于相量 $\dot I_N$ 的保梯电抗压降相量 $\dot I_N X_p$，$\dot U_N$、$\dot I_N R_a$ 和 $\dot I_N X_p$ 的相量和为相量 $\dot E_p$，$\dot E_p$ 与纵轴的夹角为 γ。

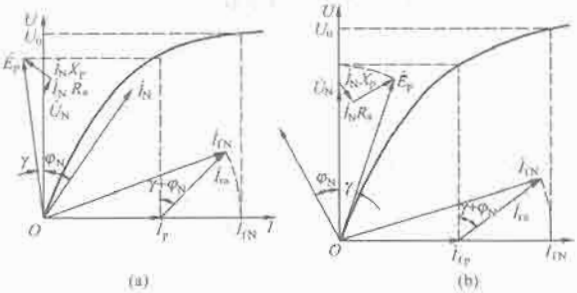


图 2.2-12 用作图法确定额定电流

(a) 发电机；(b) 电动机

4) 由空载特性确定的对应于 $\dot E_p$ 的励磁电流为 $\dot I_{fp}$。在相量 $\dot I_{fp}$ 终端上与纵轴成 $\gamma+\varphi_N$ 角作相量 $\dot I_{fa}$［其值等于图 2.2-11 (a) 中的 b′c′］。

以上为励磁电流的常规算法。由于同步电机运行中的磁场分布十分复杂，这种算法的计算结果精度有限。励磁电流的准确计算建议采用电磁场数值方法来进行。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3.3　并网

为了避免电机对电网产生过大的冲击电流，同时也为了避免电机的转轴上产生过大的冲击转矩，同步发电机在并入电网时，应使其满足下列条件：

1）发电机的相序与电网一致。

2）发电机的频率与电网相同。

3）发电机的励磁电动势与电网电压大小相等，相位相同。

具体地，实际运行中有如下几种并网情况：

1）准同步并网条件。同步电机并入电网时具备规定的全部并网条件者，称为同步并网。允许其中的电压或频率存在一定偏差时的并网，称为准同步并网。运行部门的发电机运行规程规定，当发电机频率与系统频率之差在 1Hz 以内时，可将同步检定器接入。

2）自同步并网条件。在特殊的情况下，允许将未加励磁的同步电机加速到接近同步转速时并网，并网后立即供给励磁。这样的并网过程，称为自同步并网。能否采用自同步并网的条件为并网合闸时的冲击电流小于 $0.74/X''^{*}_{d}$，其中 X''^{*}_{d} 为直轴超瞬变电抗的标么值。

3.4　无功功率调节

同步电机的无功功率调节是指，假设电网电压和频率保持不变，电机的有功功率保持不变，在此基础上改变电机无功功率的过程。

为简化计算，不计转子的凸极效应（即以隐极同步电机为例），并略去定子电阻的影响，由功率平衡关系可知，发电机的电磁功率和有功功率近似保持不变，并存在如下关系

$$P_{em} = m\frac{E_0 U}{X_t}\sin\delta = \text{Const} \tag{2.2-17}$$

$$P = mUI\cos\varphi = \text{Const} \tag{2.2-18}$$

由此可知

$$E_0\sin\delta = \text{Const} \tag{2.2-19}$$

$$I\cos\varphi = \text{Const} \tag{2.2-20}$$

由上面两个关系式极易得到同步发电机和同步电动机无功调节的相量图，如图 2.2-13 所示。图中 $\dot{E}_{01}$、$\dot{E}_{02}$、$\dot{E}_{03}$ 分别为三种不同励磁电流 $\dot{I}_{f1}$、$\dot{I}_{f2}$、$\dot{I}_{f3}$ 时的励磁电动势，$\dot{I}_1$、$\dot{I}_2$、$\dot{I}_3$ 是对应的负载电流，φ_1 为 $\dot{I}_1$ 时的功率因数角。其中 $\dot{E}_{01}$、$\dot{E}_{02}$、$\dot{E}_{03}$、…的值，可从电机的空载特性曲线上根据其对应的励磁电流值 $\dot{I}_{f1}$、$\dot{I}_{f2}$、$\dot{I}_{f3}$、…查得，据此可绘制出如图 2.2-14 所示的 V 形曲线。

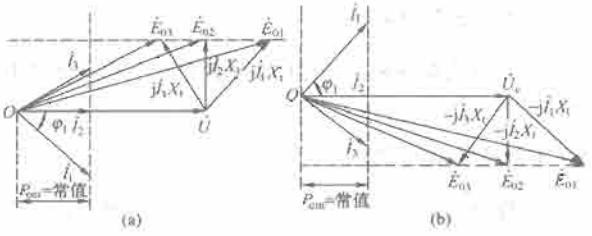


图 2.2-13　调整励磁电流时的同步电机相量图
（a）发电机；（b）电动机

V 形曲线有如下特点：

1）对应于任一常值的有功功率下的 V 形曲线均有一个最低点，此点表征该有功输出时的功率因数为 1.0，此点所对应的励磁电流称为正常励磁电流。

2）当过励磁时，即励磁电流大于正常的励磁电流时，发电机向电网输出的电流滞后于端电压，电动机则从电网吸收超前于端电压的电流。

3）当欠励磁时，即励磁电流小于正常的励磁电流时，负载电流与端电压的相位关系与 2）所述相反。

4）欠励磁有一定的限度，其极限值为工作功角 θ 接近 90°（凸极电机小于90°）时的励磁。如果进一步减小励磁，则电机将失去稳定。

5）图 2.2-14 中 $P_{em}=0$ 的 V 形曲线，可看作同步调相机的 V 形曲线。实际上，作为调相机的 V 形曲线，P_{em} 要略大于 0，即需由电网输入少量有功功率以补偿其损耗。

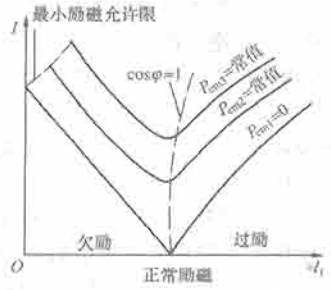


图 2.2-14　同步电机的 V 形曲线

3.5　发电电动机的起动

为了对电力系统的负荷进行调节，在某些电站，同步电机要在发电机和电动机两种运行方式下工作，习惯上，这种电机称为发电电动机。由于发电电动机的容量通常较大，其起动方式的选择十分重要。

电机的起动是指电机转子从静止到转动起来的过程。发电电动机的起动包括发电机工况的起动和电动机工况的起动两种情况。这里重点讨论发电电动机在电动机运行方式中的起动。

（1）辅助电动机起动

这种起动方式是在发电电动机的轴上安装一台辅助电动机。辅助电动机专门用于发电电动机在抽水运行方式时的起动。辅助电动机通常为绕线转子异步电动机，其同步转速比发电电动机略高。

（2）异步起动

异步起动是发电电动机的一种自起动方式。异步起动时，发电电动机的励磁绕组短接，将发电电动机直接并入电网，此时发电电动机的定子旋转磁场在转子阻尼绕组中感生电流，并产生异步电磁转矩。异步电磁转矩拖动发电电动机机组的转子转动起来，达到牵入转速时，在转子的励磁绕组上加上励磁电压，将转子拉入同步。

根据起动过程中定子端所加电压的大小，异步起动方式可分为全压起动、降压起动两种方式。

（3）发电电动机的背靠背起动

背靠背起动是用本电站或相邻电站的一台常规发电机组或发电电动机机组作为发电机，直接起动其他发电电动机，使之按电动机方式运行的一种起动方式。发电电动机按背靠背起动方式起动时，首先将被起动机组（作电动机运行的发电电动机）与起动机组（作发电机运行的发电电动机）在电气上连接，并分别加上励磁。调整水轮机导叶使水轮发电机起动，逐渐转动起来的发电机产生频率由小到大变化的三相交流电压，此电压直接作用在被起动机组的定子绕组上，使被起动机组在同步转矩作用下跟随发电机逐步升速。当转速

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

达到同步转速的80%左右时，投入各自的励磁调节器，使发电机达到同步转速，然后并入电网，再逐步解除发电机，完成起动过程。原理上，背靠背起动过程也是一种同步变频起动过程。

(4) 发电电动机的变频器起动

变频器起动方式是通过静止变频器产生频率可变的交流电对发电电动机进行起动的一种起动方式。随着电力电子技术的发展，变频器起动方式已逐渐成为发电电动机最受欢迎的起动方式。

抽水蓄能电机的变频起动系统通常采用闭环控制，又称自控式变频调速系统。这种控制方式基本上可以保证发电电动机的起动过程不会失步。目前大容量抽水蓄能机组的起动装置通常都采用LCI（负载换流逆变器）变频技术。采用LCI变频技术时，由于低速情况下电机的感应电动势很低，不能实现换流，实用上采用一种脉冲步进方式作为低频调节方式。

在脉冲步进驱动方式下，按定子三相电流的相量空间分布，在360°电角度的相量空间中存在六个磁动势分布位置，如图2.2-15所示。通过变频装置对各相电流按图的馈电时序依次通电，可在电机定子中建立一步进旋转磁场，并拖动电机运行。图2.2-16为对应图2.2-15的定子电流理想波形示意图。从图中可见，步进驱动方式中电机转子的位置检测很重要。准确的转子位置检测是发电电动机成功起动的必要保证。

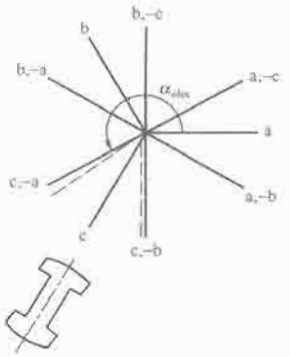


图2.2-15 步进驱动方式定子馈电相量时序图

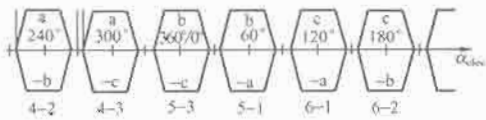


图2.2-16 步进驱动方式定子电流理想波形示意图

实际起动过程中，随着电机转子转速的上升，电机定子电流的频率是变化的，定子电流的实际波形如图2.2-17所示。从图中可以清晰地看出随着转速的上升各相电流的变化规律。

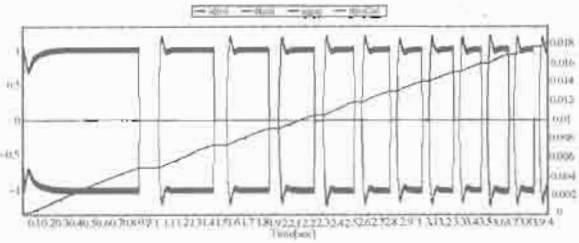


图2.2-17 步进驱动方式下起动过程定子电流和转子转速的数字仿真结果

静止变频器通常包括桥式整流电路和逆变电路，两者通过一平波电抗器相连接。通过转子转速传感器检测的转速信号，变频控制系统可实现电机转速变化的自动调节。

变频器投入运行时，其整流部分将在其输入端产生谐波，形成电网的谐波污染，并使厂用电电压发生畸变。因此有些电站在设计时对厂用系统谐波电流实行限制。我国目前建造的大型抽水蓄能电站大都装设了谐波滤波器。

4 不对称运行

实际运行时，由于电网负荷分配的不均，或电力系统的故障，同步电机有时要处在不对称运行方式下。不对称运行会导致同步电机局部过热、振动或出现过电压现象。因此同步电机不对称运行方式的分析十分重要。

4.1 对称分量法

分析电机的稳态不对称问题通常采用对称分量法。对于对称结构的同步电机，当三相电压不对称时，这种不对称的三相电压可以等效地分解为三组对称的正序、负序和零序电压之和，并满足如下关系

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_A\\ \dot{U}_B\\ \dot{U}_C\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ a^2 & a & 1\\ a & a^2 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_+\\ \dot{U}_-\\ \dot{U}_0\end{bmatrix} \tag{2.2-21}$$

式中，$\dot{U}_A$、$\dot{U}_B$、$\dot{U}_C$ 分别为同步电机的三相电压相量；$\dot{U}_+$、$\dot{U}_-$、$\dot{U}_0$ 分别为正序、负序、零序电压相量。变换矩阵中的旋转因子如下定义

$$a=e^{j120^\circ}$$

相量乘以 a 表示把此相量沿正方向转过120°电角度。

与电压类似，三相交流系统的电流亦存在类似关系

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_A\\ \dot{I}_B\\ \dot{I}_C\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ a^2 & a & 1\\ a & a^2 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_+\\ \dot{I}_-\\ \dot{I}_0\end{bmatrix} \tag{2.2-22}$$

式中，$\dot{I}_A$、$\dot{I}_B$、$\dot{I}_C$ 分别为同步电机的三相电流相量；$\dot{I}_+$、$\dot{I}_-$、$\dot{I}_0$ 分别为正序、负序、零序电流相量。

由式(2.2-21)和式(2.2-22)可以灵活地推导电机的正、负零序阻抗之间的关系。

同步电机的各相序阻抗是不同的，应按照各自对应的有功损耗（相序电阻）或磁场（相序电抗），分别进行计算。

有关同步电机的相序电动势方程和相序阻抗见表2.2-5。

4.2 不对称稳态短路

同步发电机在各种不对称稳态短路情况下的电流和电压见表2.2-6。

4.3 不对称负载的影响

由对称分量法可知，在不对称负载运行情况下，同步发电机不仅承受一个正向旋转磁场（正序磁场），同时还要承受一个反向旋转磁场（负序磁场）的影响。负序磁场由于相对转子以两倍的同步转速旋转，将会在转子上感生涡流。对实心转子同步电机，将在转子本体及相关结构件上产生涡流，引起局部过热。对有阻尼绕组的凸极同步电机，负序磁场将在转子的阻尼绕组中产生较大的电流，并引起发热、电磁振动以及由此导致阻尼系统和铁心的损坏。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 2.2-5　　相序电动势方程和相序电阻

		正　序	负　序	零　序
电动势方程		$\dot{U}_{A1}=\dot{E}_A-\dot{I}_{A1}Z_1$	$\dot{U}_{A2}=-\dot{I}_{A2}Z_2$	$\dot{U}_{A0}=-\dot{I}_{A0}Z_0$
相序电阻	隐极	$Z_1=R_a+jX_1$	$Z_2=R_2+jX_2$	$Z_0=R_0+jX_0$
	凸极	$\dot{I}_{A1}Z_1=I_{Ad}R_a+j(I_{Ad}X_d+I_{Aq}X_q)$ $\dot{I}_{A0}=I_{A1}\sin\Psi_0$ $\dot{I}_{Ad}=I_{A1}\cos\Psi_0$	$Z_2=R_2+jX_2$	$Z_0=R_0+jX_0$
备注		凸极电机的 $Z_1=R_a+jX_1$，X_1 是 X_d、X_q 和 φ_0 的函数；正序电阻 $R_1=R_a$；E_A 为励磁电动势	R_2 是负序电阻 电流为正弦时 $X_2=\frac{1}{2}(X''_d+X''_q)$ 外施负序电压为正弦时，$X_2=2X''_dX''_q/(X''_d+X''_q)$，负序电流产生的电枢磁场对磁极有相对转速，故负序电流所对应的负序电抗为介于直轴和交轴超瞬变电抗之间的值（电机具有阻尼绕组或具有一定的阻尼效应时） X_2 的其他表达形式参见本章 6.5 节	R_0 是零序电阻，零序电抗与零序电流对应，因零序电流只产生漏磁场和三次谐波气隙磁场，故 $X_0<X_a$。

表 2.2-6　　不对称稳态短路电流和电压

短路情况	两相相间短路	单相对中性点短路	两相对中性点短路
正序分量 I_1	$\frac{\dot{E}}{Z_1+Z_2}$	$\frac{\dot{E}}{Z_1+Z_2+Z_0}$	$\frac{\dot{E}}{Z_1+\frac{Z_0Z_2}{Z_0+Z_2}}$
负序分量 I_2	$-I_1$	I_1	$\frac{-\dot{E}}{Z_1+Z_2+\frac{Z_1Z_2}{Z_0}}$
零序分量 I_0	0	I_1	$\frac{-\dot{E}}{Z_1+Z_0+\frac{Z_1Z_0}{Z_2}}$
短路相电流 I	$I=\sqrt{3}I_1$	$I=3I_1$	$\dot{I}_a=\dot{I}_0+\dot{I}_1+\dot{I}_2$ $\dot{I}_b=\dot{I}_0+a^2\dot{I}_1+a\dot{I}_2$ $\dot{I}_c=\dot{I}_0+a\dot{I}_1+a^2\dot{I}_2$ $I=\frac{\sqrt{3}\sqrt{\lvert Z_2^2+Z_2Z_0+Z_0^2\rvert}E}{\lvert Z_1Z_2+Z_1Z_0+Z_0Z_2\rvert}$
开路相电压	$\dot{U}_a=2\dot{E}\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}$ $\dot{U}_b=\dot{U}_c=-\dot{E}\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}$	$\dot{U}_b=\frac{j\sqrt{3}\dot{E}(aZ_0-Z_2)}{Z_1+Z_2+Z_0}$ $\dot{U}_c=-\frac{j\sqrt{3}\dot{E}(a^2Z_0-Z_2)}{Z_1+Z_2+Z_0}$ $\dot{U}_{bc}=-\frac{j\sqrt{3}\dot{E}(Z_0+2Z_2)}{Z_1+Z_2+Z_0}$	$\dot{U}_a=\frac{3\dot{E}Z_2Z_0}{Z_1Z_2+Z_2Z_0+Z_0Z_1}$

因此，对负载不对称程度及相应运行时间要给予必要的限制。目前国际标准和我国的国家标准对同步电机的不对称运行都进行了限制。对长期稳态不对称运行，一般从转子发热角度出发，对稳态负序电流 I_2 与额定电流 I_N 之比的百分值进行限制。而对瞬时不对称负载运行，则对 $(I_2/I_N)^2t$ 做出限制。

对于灯泡贯流式水轮发电机，除如上对阻尼绕组的负序电流进行计算外，还应对阻尼系统的电磁力进行核算，防止阻尼系统电蚀现象（振动打火引起局部高温烧损）的发生。

5　瞬态数学模型

稳态情况下，同步电机中的各物理量接近正弦变化。忽略谐波并将转子绕组的影响以感应电动势的形式归入定子时，可以将同步电机的方程归为统一旋转因子下的相量空间去解决，由此可采用相量（复数）的方程来处理。

当电机的运行状态从一个稳定工作点向另一个稳定工作点转变时，就出现了电机运行的过度状态，称为瞬态。在瞬态情况下，同步电机中的物理模型和数学方程十分复杂，涉及转子旋转引起的参数变化以及铁磁材料的非线性影响等，需要建立详细的分析方法。

5.1　双轴理论

解决参数非线性变化的一种有效方法是引入双轴理论。通过引入双轴理论可以将三相静止坐标系统的变量转换到两相同步旋转坐标系统中，将静止坐标系统中变化的参数变化成旋转坐标系统中不变的参数，从而得到的瞬态物理问题的简洁描述。

5.1.1　空间综合矢量

每相参量的瞬时值就是该参量的综合空间旋转矢量对某

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

个轴的投影。电机的空间可用复数坐标系统来描述，通常以 A 相轴线作为实数轴，顺着 A、B、C 方向转过 90°处所取的轴线作为虚数轴。于是电流、电压乃至磁链的空间相量均可以表达为如下的形式，例如，电流的空间综合相量表达式为

$$\dot{I}=\frac{2}{3}\begin{bmatrix}1 & a & a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_a\\ i_b\\ i_c\end{bmatrix} \tag{2.2-23}$$

式中，相因子 $a=e^{j120^\circ}$。

5.1.2 坐标变换

把两相坐标系统放在转子上，其中一相与转子磁极的中心线重合，称为 d 轴（即直轴）；另一相与之成 90°电角度，称为 q 轴（交轴），如图 2.2-18 所示。

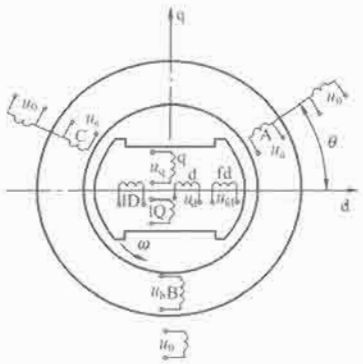


图 2.2-18 凸极同步电机直轴和交轴绕组图（坐标系统）

综合矢量 i 在 d、q 两轴上的投影值即在等效绕组中流过的电流 i_d 和 i_q，可由变换公式从原来的 i_a、i_b、i_c 得到。由此按空间综合矢量不变的原则，得到坐标变换公式如下

$$\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\\ i_0\end{bmatrix}=C\begin{bmatrix}i_a\\ i_b\\ i_c\end{bmatrix}\text{ 或 }\begin{bmatrix}i_a\\ i_b\\ i_c\end{bmatrix}=C^{-1}\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\\ i_0\end{bmatrix} \tag{2.2-24}$$

式中，零轴电流分量为

$$i_0=\frac{1}{3}(i_a+i_b+i_c) \tag{2.2-25}$$

C 和 C^{-1} 分别为变换矩阵和逆变换矩阵，其表达式为

$$C=\frac{2}{3}\begin{bmatrix}\cos\theta & \cos\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\end{bmatrix}$$

$$C^{-1}=\begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta & 1\\ \cos\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) & 1\\ \cos\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right) & 1\end{bmatrix} \tag{2.2-26}$$

如此得到的坐标系统称为 dq0 坐标系统，相应的变换称为 dq0 变换。

5.2 派克方程

按发电机参考方向，将定子各相绕组的电压、电流、磁链变换到 d、q、0 坐标系统下，可以建立电机的系统方程。

将转子绕组的物理量归算到定子侧，按工程 X_{ad} 基准取基值系统见表 2.2-7，可得相应的标么值形式方程为

$$\left.\begin{aligned}u_d&=p\Psi_d-\omega\Psi_q-ri_d\\ u_q&=p\Psi_q+\omega\Psi_d-ri_q\\ u_0&=p\Psi_0-ri_0\end{aligned}\right\} \tag{2.2-27}$$

式中，$p=\mathrm{d}/\mathrm{d}t$ 为微分算子；r 为电枢绕组电阻 R_a 的标么值；u_d、u_q 为等效绕组 d 及 q 的端电压；u_0 为与其他轴隔离的零轴绕组的端电压。

在角速度 ω=常值的情况下，式（2.2-27）为常系数微分方程组。因 d、q、0 坐标系与转子一起以角速度 ω 旋转，故 Ψ_d、Ψ_q 除在 d、q 轴等效绕组中感应变压器电动势 $p\Psi_d$、$p\Psi_q$ 之外，还会感生运动电动势 $\omega\Psi_d$ 和 $\omega\Psi_q$。

表 2.2-7 同步电机的基准值

参数 / 绕组	电流基值	电压基值	阻抗基值	电感基值
定子绕组	$i_{(b)}=\sqrt{2}I_N$	$u_{(b)}=\sqrt{2}U_{N\varphi}$	$Z_{(b)}=u_{(b)}/i_{(b)}$	$L_{(b)}=Z_{(b)}T_{(b)}$
转子励磁绕组	$i_{fd(b)}=i_{(b)}\frac{L_{ad}}{M_{afd0}}$	$u_{fd(b)}=\frac{3}{2}u_{(b)}\frac{i_{(b)}}{i_{fd(b)}}$	$Z_{fd(b)}=\frac{3}{2}Z_{(b)}\left[\frac{i_{(b)}}{i_{fd(b)}}\right]^2$	$L_{fd(b)}=\frac{3}{2}Z_{(b)}\left[\frac{i_{(b)}}{i_{fd(b)}}\right]^2T_{(b)}$
直轴阻尼绕组	$i_{1D(b)}=i_{(b)}\frac{L_{ad}}{M_{aD0}}$	$u_{1D(b)}=\frac{3}{2}u_{(b)}\frac{i_{(b)}}{i_{1D(b)}}$	$Z_{1D(b)}=\frac{3}{2}Z_{(b)}\left[\frac{i_{(b)}}{i_{1D(b)}}\right]^2$	$L_{1D(b)}=\frac{3}{2}Z_{(b)}\left[\frac{i_{(b)}}{i_{1D(b)}}\right]^2T_{(b)}$
交轴阻尼绕组	$i_{1Q(b)}=i_{(b)}\frac{L_{aq}}{M_{aQ0}}$	$u_{1Q(b)}=\frac{3}{2}u_{(b)}\frac{i_{(b)}}{i_{1Q(b)}}$	$Z_{1Q(b)}=\frac{3}{2}Z_{(b)}\left[\frac{i_{(b)}}{i_{1Q(b)}}\right]^2$	$L_{1Q(b)}=\frac{3}{2}Z_{(b)}\left[\frac{i_{(b)}}{i_{1Q(b)}}\right]^2T_{(b)}$
参数 / 绕组	磁链基值	时间基值	功率基值	转矩基值
定子绕组	$\Psi_{(b)}=u_{(b)}T_{(b)}$	$t_{(b)}=\frac{1}{2\pi f_0}$	$P_{(b)}=\frac{3}{2}u_{(b)}i_{(b)}$	$T_{(b)}=P_{(b)}/(\omega_0/p)$ 式中，p 为极对数
转子励磁绕组	$\Psi_{fd(b)}=\frac{3}{2}u_{(b)}\frac{i_{(b)}}{i_{fd(b)}}T_{(b)}$	—	—	—
直轴阻尼绕组	$\Psi_{1D(b)}=\frac{3}{2}u_{(b)}\frac{i_{(b)}}{i_{1D(b)}}T_{(b)}$	—	—	—
交轴阻尼绕组	$\Psi_{1Q(b)}=\frac{3}{2}u_{(b)}\frac{i_{(b)}}{i_{1Q(b)}}T_{(b)}$	—	—	—

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

转子上除励磁绕组之外，在 d、q 轴上只考虑各有一个阻尼回路的情况，以下凡是转子的物理量和参数均用大写表示。下标以 fd、1d、1q 分别表示励磁绕组、直轴阻尼绕组和交轴阻尼绕组。于是转子回路的电压方程为

$$\left.\begin{aligned} U_{fd} &= p\Psi_{fd} + R_{fd} I_{fd} \\ U_{1d} = 0 &= p\Psi_{1d} + R_{1d} I_{1d} \\ U_{1q} = 0 &= p\Psi_{1q} + R_{1q} I_{1q} \end{aligned}\right\} \tag{2.2-28}$$

考虑到电感的标么值和额定频率时的相应的电抗标么值相等，标么值磁链方程为

$$\left.\begin{aligned} \Psi_d &= -x_d i_d + x_{ad} I_{fd} + x_{ad} I_{1d} \\ \Psi_q &= -x_q i_q + x_{aq} I_{1q} \\ \Psi_0 &= -x_0 i_0 \\ \Psi_{fd} &= -x_{ad} i_d + X_{fd} I_{fd} + X_{fd1d} I_{1d} \\ \Psi_{1d} &= -x_{ad} i_d + X_{1dfd} I_{fd} + X_{1d} I_{1d} \\ \Psi_{1q} &= -x_{aq} i_q + X_{1q} I_{1q} \end{aligned}\right\} \tag{2.2-29}$$

式 (2.2-27) ～式 (2.2-29) 组成了同步电机在 dq0 系统中的电压和磁链的方程组，通常称为派克方程。

5.2.1　同步电机的功率和电磁转矩

定子绕组瞬时输出功率的标么值为

$$P = \frac{2}{3}(u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c) \tag{2.2-30}$$

转换到 dq0 系统中为

$$P = (u_d i_d + u_q i_q) + 2u_0 i_0 \tag{2.2-31}$$

电磁转矩的标么值为

$$T_{em} = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d \tag{2.2-32}$$

5.2.2　转子运动方程与惯性常数

转子机械系统运动方程的标么值为

$$H\frac{d\omega}{dt} = T_m - T_{em} \tag{2.2-33}$$

$$H = \frac{2\pi^3 f}{g}\frac{GD^2}{S_N}\left(\frac{n}{60}\right)^2 \tag{2.2-34}$$

式中，H 为惯性常数，rad（电）；T_m 为作用在转轴上的有效机械功转矩；θ 为功角，rad（机）；GD^2 为转子的飞轮力矩，kN·m²；n 为转速，r/min；S_N 为额定容量，kVA；g 为重力加速度，m/s²。

实用中转子运动方程的各物理量，实际值与标么值共用，式 (2.2-33) 中，当 H 单位用 s、t 单位用 s、θ 单位用 rad（电）、ω 单位用 rad/s，而 T_m 和 T_{em} 用标么值时，则转子运动方程变为

$$\frac{H}{2\pi f}\frac{d\omega}{dt} = T_m - T_{em} \tag{2.2-35}$$

$$H = \frac{2.8GD^2 n^2}{S_N} \times 10^{-4} \tag{2.2-36}$$

5.2.3　额定起动时间

当 $T_m - T_{em} = \Delta T = 1$ 时，即剩余转矩等于额定转矩，转子由静止状态加速到额定转速所需的时间，称为额定起动时间 τ，其值为

$$\tau = H \tag{2.2-37}$$

5.2.4　完整的方程组

把式 (2.2-29) 代入式 (2.2-27) 和式 (2.2-28)，即可得完整的方程组式 (2.2-38)。式 (2.2-38) 中系数都是常值，且互感系数可逆，该式是时域内的微分方程，应用拉氏变换可把它变换到复频域成为代数方程组。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ U_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r+px_d) & \omega x_q & 0 & px_{ad} & px_{ad} & -\omega x_{aq} \\ -\omega x_d & -(r+px_q) & 0 & \omega x_{ad} & \omega x_{ad} & px_{aq} \\ 0 & 0 & -(r+px_0) & 0 & 0 & 0 \\ -px_{ad} & 0 & 0 & (R_{fd}+pX_{fd}) & pX_{fd1d} & 0 \\ -px_{ad} & 0 & 0 & pX_{fd1d} & (R_{1d}+pX_{1d}) & 0 \\ 0 & -px_{aq} & 0 & 0 & 0 & (R_{1q}+pX_{1q}) \end{bmatrix} \omega \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ I_{fd} \\ I_{1d} \\ I_{1q} \end{bmatrix} \tag{2.2-38}$$

5.3　运算电抗及其等效电路表述

在研究运行问题时，同步电机对系统的影响通常都是通过其定子边的物理量来反映的，因而有必要建立一种等效电抗，用以等效地反映动态过程中定、转子间电磁感应关系。把方程组中的转子边物理量 I_{fd}、I_{1d}、I_{1q} 消去，并设励磁绕组短路（转子零激励），式 (2.2-38) 可转化为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[r+px_d(p)] & \omega x_q(p) \\ -\omega x_d(p) & -[r+px_q(p)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \tag{2.2-39}$$

式中，$x_d(p)$、$x_q(p)$ 为直轴、交轴运算电抗。

$$\left.\begin{aligned} x_d(p) &= x_d - \frac{(X_{fd}x_{ad}^2 + X_{1d}x_{ad}^2 - 2X_{fd1d}x_{ad}^2)p^2 + (x_{ad}^2 R_{fd} + x_{ad}^2 R_{1d})p}{(X_{fd}X_{1d} - X_{fd1d}^2)p^2 + (X_{fd}R_{1d} + X_{1d}R_{fd})p + R_{fd}R_{1d}} \\ x_q(p) &= x_q - \frac{x_{aq}^2 p}{X_{1q}p + R_{1q}} \end{aligned}\right\} \tag{2.2-40}$$

运算电抗含有原方程阻抗矩阵中所有元素，比较复杂。如果用电抗和时间常数来表达运算电抗，同时略去一些因素，可使公式简明实用。

$$\left.\begin{aligned} x_d(p) &= x_d \frac{(1+T'_d p)(1+T''_d p)}{(1+T'_{d0} p)(1+T''_{d0} p)} \\ x_q(p) &= x_q \frac{1+T''_q p}{1+T''_{q0} p} \end{aligned}\right\} \tag{2.2-41}$$

将磁链方程简化，可以得到图 2.2-19 和图 2.2-20 中等效电路的表述方式，图中

$$x_\sigma = x_d - x_{ad}$$

$$X_{fd1} = X_{fd} - x_{fd1d}$$

$$X_{1d1} = X_{1d} - X_{fd1d} \quad X_{1q1} = X_{1q} - X_{aq}$$

根据图 2.2-19 简化等效电路，当 $u_{fd}/p=0$ 时得直轴运算电抗，根据图 2.2-20 得交轴运算电抗，它们分别是

$$\left.\begin{aligned} x_d(p) &= x_\sigma + \frac{1}{\dfrac{1}{x_{ad}} + \dfrac{1}{X_{fd1} + \dfrac{R_{fd}}{p}} + \dfrac{1}{X_{1d1} + \dfrac{R_{1d}}{p}}} \\ x_q(p) &= x_\sigma + \frac{1}{\dfrac{1}{x_{aq}} + \dfrac{1}{X_{1q1} + \dfrac{R_{1q}}{p}}} \end{aligned}\right\} \tag{2.2-42}$$

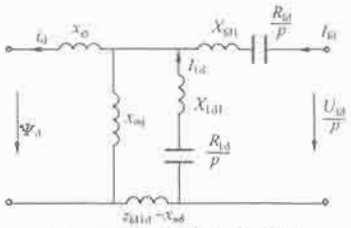


图 2.2-19　同步电机简化直轴等效电路

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

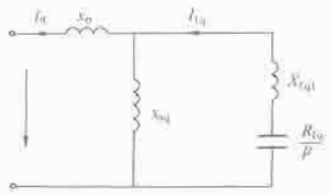


图 2.2-20 同步电机简化交轴等效电路

5.4 瞬态过程的电磁参数

5.4.1 瞬变电抗和同步电抗

取运算电抗中的 $p=\infty$，即得时域 $t=0$ 时同步电机的超瞬变电抗

$$\left.\begin{aligned} x''_{\mathrm{d}} &= x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{\mathrm{ad}}}+\frac{1}{X_{\mathrm{fd1}}}+\frac{1}{X_{\mathrm{1d1}}}} \\ x''_{\mathrm{q}} &= x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{\mathrm{aq}}}+\frac{1}{X_{\mathrm{1q1}}}} \end{aligned}\right\} \tag{2.2-43}$$

当转子上不装阻尼绕组时得瞬变电抗为

$$\left.\begin{aligned} x'_{\mathrm{d}} &= x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{\mathrm{ad}}}+\frac{1}{X_{\mathrm{fd1}}}} \\ x'_{\mathrm{q}} &= x_\sigma + x_{\mathrm{aq}} \end{aligned}\right\} \tag{2.2-44}$$

如果令运算电抗中的 $p=0$，即可得 $t=\infty$ 时（稳态运行）同步电抗为

$$\left.\begin{aligned} x_{\mathrm{d}} &= x_\sigma + x_{\mathrm{ad}} \\ x_{\mathrm{q}} &= x_\sigma + x_{\mathrm{aq}} \end{aligned}\right\} \tag{2.2-45}$$

5.4.2 时间常数

式（2.2-41）中的 T'_{d}、T''_{d}、T'_{d0}、T''_{d0}、T''_{q}、T''_{q0} 的计算公式如下：

1）电枢绕组开路时的直轴超瞬变和瞬变时间常数

$$\left.\begin{aligned} T''_{\mathrm{d0}} &= \frac{1}{2}(T_{\mathrm{fd}}+T_{\mathrm{1d}})(1-q) \\ T'_{\mathrm{d0}} &= \frac{1}{2}(T_{\mathrm{fd}}+T_{\mathrm{1d}})(1+q) \end{aligned}\right\} \tag{2.2-46}$$

式中

$$T_{\mathrm{fd}} = \frac{X_{\mathrm{fd}}}{R_{\mathrm{fd}}}$$

$$T_{\mathrm{1d}} = \frac{X_{\mathrm{1d}}}{R_{\mathrm{1d}}}$$

$$q = \sqrt{1-\frac{4\sigma_{\mathrm{f1d}}T_{\mathrm{fd}}T_{\mathrm{1d}}}{(T_{\mathrm{fd}}+T_{\mathrm{1d}})^2}}$$

$$\sigma_{\mathrm{f1d}} = 1-\frac{X^2_{\mathrm{fd1d}}}{X_{\mathrm{fd}}X_{\mathrm{1d}}}$$

2）电枢绕组短路时的直轴超瞬变和瞬变时间常数

$$\left.\begin{aligned} T''_{\mathrm{d}} &= \frac{1}{2}(T'_{\mathrm{fd}}+T'_{\mathrm{1d}})(1-q') \\ T'_{\mathrm{d}} &= \frac{1}{2}(T'_{\mathrm{fd}}+T'_{\mathrm{1d}})(1+q') \end{aligned}\right\} \tag{2.2-47}$$

式中

$$T'_{\mathrm{fd}} = \frac{X'_{\mathrm{fd}}}{R_{\mathrm{fd}}}$$

$$T'_{\mathrm{1d}} = \frac{X'_{\mathrm{1d}}}{R_{\mathrm{1d}}}$$

$$q' = \sqrt{1-\frac{4\sigma'_{\mathrm{f1d}}T'_{\mathrm{fd}}T'_{\mathrm{1d}}}{(T'_{\mathrm{fd}}+T'_{\mathrm{1d}})^2}}$$

$$\sigma'_{\mathrm{f1d}} = 1-\frac{X'^2_{\mathrm{fd1d}}}{X'_{\mathrm{fd}}X'_{\mathrm{1d}}}$$

$$X'_{\mathrm{fd}} = x_{\mathrm{fd}} - \frac{x^2_{\mathrm{ad}}}{x_{\mathrm{d}}}$$

$$X'_{\mathrm{1d}} = x_{\mathrm{1d}} - \frac{x^2_{\mathrm{ad}}}{x_{\mathrm{d}}}$$

$$X'_{\mathrm{fd1d}} = \frac{1}{\frac{1}{x_\sigma}+\frac{1}{x_{\mathrm{ad}}}} = x_{\mathrm{fd1d}} - \frac{x^2_{\mathrm{ad}}}{x_{\mathrm{d}}}$$

3）电枢绕组开路时和短路时交轴阻尼绕组的时间常数

$$\left.\begin{aligned} T''_{\mathrm{q0}} &= \frac{X_{\mathrm{1q}}}{R_{\mathrm{1q}}} \\ T''_{\mathrm{q}} &= \frac{1}{R_{\mathrm{1q}}}\left\{X_{\mathrm{1q1}} + \frac{1}{\frac{1}{x_\sigma}+\frac{1}{x_{\mathrm{aq}}}}\right\} \end{aligned}\right\} \tag{2.2-48}$$

以上计算公式也可以用于隐极同步电机，当不考虑隐极电机直轴磁路饱和时，$x_{\mathrm{aq}}=x_{\mathrm{ad}}$。

5.5 派克方程的应用

派克方程式（2.2-38）综合了同步电机内各种电压、电流、磁链的相互关系，它不仅可用于求解同步电机的瞬态运行问题，也可求解稳态运行问题。

1）用于解算对称稳态运行问题时，可令式（2.2-38）中的 $p=0$，$\omega=1$，$I_{\mathrm{1d}}=0$，$I_{\mathrm{1q}}=0$，则该式变为

$$\begin{bmatrix} u_{\mathrm{d}} \\ u_{\mathrm{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r & x_{\mathrm{q}} & 0 \\ -x_{\mathrm{d}} & -r & x_{\mathrm{ad}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\mathrm{d}} \\ i_{\mathrm{q}} \\ I_{\mathrm{fd}} \end{bmatrix} \tag{2.2-49}$$

在对称稳态运行时，可知

$$u_{\mathrm{d}} = U\sin\theta, u_{\mathrm{q}} = U\cos\theta, x_{\mathrm{ad}}I_{\mathrm{fd}} = E$$

则可算得 i_{d}、i_{q}，代入式（2.2-29），可得 Ψ_{d}、Ψ_{q}，利用式（2.2-31）和式（2.2-32），当忽略 r 时，即可得到如表 2.2-3 中的 P_{em} 和 T_{em} 的表达式（以标么值表示）。

2）用于解算 ω=常数时的瞬态问题。派克方程为线性常系数微分方程组，当特征方程为二次型时，可算出特征根，应用拉氏变换可得有明晰物理意义的解析式。

用于解算 ω=常数的不对称瞬态问题时，改用其他坐标变换（如 α、β、0 等）可方便得多。

3）用于解算其他复杂的动态问题。如同时考虑励磁调节系统、原动机调节系统和电网时，把相应运动方程与上述派克方程联立求解，$\omega\neq$常数，这时得到的非线性微分方程组，或特征方程组高于二次时，无法求出特征根，可把派克方程改写成状态变量方程，用数值解法求解数值解。当然具有二次特征方程的派克方程也可以改写成状态变量方程求得数值解。

5.6 状态方程概述

用拉氏运算微分方法，可以获得常系数线性微分方程组的解析解。但当转速为变量（特别是未知量时），电机的基本方程为变系数线性微分方程或非线性微分方程，就不能用运算微积分求解，而只能用数值解法求解。这时状态方程将是最好的数学模型。其优点是一阶常系数微分方程组已有成熟的数值解法，便于编程，同时可分析变系数及非线性问题，可分析多变量、多控制量或多反馈量问题。例如研究同步电机及其励磁系统和原动机调速系统的动态特性等。在分析计及转速变化的动态过程时，至少需要同时考虑电机的机械和电磁过渡过程，即联解同步电机的电磁基本方程和转子运动方程。式（2.2-33）为标么值表示的转子运动方程，把式（2.2-32）代入则得

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$\frac{T_m}{H}=\frac{d\omega}{dt}+\frac{1}{H}(i_q\Psi_d-i_d\Psi_q) \tag{2.2-50}$$

把式（2.2-28）代入式（2.2-27）和上式，消去磁链，则得以 $[i_d,i_q,i_0,I_{fd},I_{1d},I_{1q},\omega]$ 为状态变量的状态方程

$$\left.\begin{aligned}
u_d &= -x_d pi_d + x_{ad} pI_{fd} + x_{ad} pI_{1d} - ri_d + \omega x_q i_q - \omega x_{aq} I_{1q}\\
u_q &= -x_q pi_q + x_{aq} pI_{1q} - ri_q - \omega x_d i_d + \omega x_{ad} I_{fd} + \omega x_{ad} I_{1d}\\
u_0 &= -x_0 pi_0 - ri_0\\
U_{fd} &= -x_{ad} pi_d + X_{fd} I_{fd} + X_{fd1d} I_{1d} + R_{fd} I_{fd}\\
U_{1d} = 0 &= -x_{ad} pi_d + X_{fd1d} pI_{fd} + X_{1d} pI_{1d} + R_{1d} I_{1d}\\
U_{1q} = 0 &= -x_{aq} pi_q + X_{1q} pI_{1q} + R_{1q} I_{1q}\\
\frac{T_m}{H} &= p\omega - \frac{x_d i_q}{H} i_d + \frac{x_q i_d}{H} i_q + \frac{x_{ad} i_q}{H} I_{fd} + \frac{x_{ad} i_q}{H} I_{1d} - \frac{x_{aq} i_d}{H} I_{1q}
\end{aligned}\right\} \tag{2.2-51}$$

从上式可看出电机转速变化时的状态方程为

$$\begin{bmatrix} u_d\\ u_q\\ u_0\\ U_{fd}\\ U_{1d}\\ U_{1q}\\ \frac{T_m}{H}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -x_d & 0 & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 & 0\\ 0 & -x_q & 0 & 0 & 0 & x_{aq} & 0\\ 0 & 0 & -x_0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ -x_{ad} & 0 & 0 & X_{fd} & X_{fd1d} & 0 & 0\\ -x_{ad} & 0 & 0 & X_{fd1d} & X_{1d} & 0 & 0\\ 0 & -x_{aq} & 0 & 0 & 0 & X_{1q} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{i}_d\\ \dot{i}_q\\ \dot{i}_0\\ \dot{I}_{fd}\\ \dot{I}_{1d}\\ \dot{I}_{1q}\\ \dot{\omega}\end{bmatrix}+$$

$$\begin{bmatrix} -r & \omega x_q & 0 & 0 & 0 & -\omega x_{aq} & 0\\ -\omega x_d & -r & 0 & \omega x_{ad} & \omega x_{ad} & 0 & 0\\ 0 & 0 & -r & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{1d} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{1q} & 0\\ \frac{-x_d i_q}{H} & \frac{x_q i_d}{H} & 0 & \frac{x_{ad} i_q}{H} & \frac{x_{ad} i_q}{H} & \frac{-x_{aq} i_d}{H} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d\\ i_q\\ i_0\\ I_{fd}\\ I_{1d}\\ I_{1q}\\ \omega\end{bmatrix} \tag{2.2-52}$$

式（2.2-52）可简化为

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{Y}}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{Y} \tag{2.2-53}$$

式中，$\boldsymbol{Y}$ 为状态变量列矩阵，$\boldsymbol{Y}=[i_d,i_q,i_0,I_{fd},I_{1d},I_{1q},\omega]^T$；$\boldsymbol{Y}$ 为状态变量的导数；$\boldsymbol{F}$ 为外力函数的列矩阵，$\boldsymbol{F}=[u_d,u_q,u_0,U_{fd},U_{1d},U_{1q},T_m/H]^T$。

把式（2.2-53）写成标准形式的状态方程，有

$$\dot{\boldsymbol{Y}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{F} \tag{2.2-54}$$

式中

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{C}^{-1}$$

$$\boldsymbol{A}=-\boldsymbol{B}\boldsymbol{D}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} -x_d & 0 & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 & 0\\ 0 & -x_q & 0 & 0 & 0 & x_{aq} & 0\\ 0 & 0 & -x_0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ -x_{ad} & 0 & 0 & X_{fd} & X_{fd1d} & 0 & 0\\ -x_{ad} & 0 & 0 & X_{fd1d} & X_{1d} & 0 & 0\\ 0 & -x_{aq} & 0 & 0 & 0 & X_{1q} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}^{-1}$$

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} -r & \omega x_q & 0 & 0 & 0 & -\omega x_{aq} & 0\\ -\omega x_d & -r & 0 & \omega x_{ad} & \omega x_{ad} & 0 & 0\\ 0 & 0 & -r & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{1d} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{1q} & 0\\ \frac{-x_d i_q}{H} & \frac{x_q i_d}{H} & 0 & \frac{x_{ad} i_q}{H} & \frac{x_{ad} i_q}{H} & \frac{-x_{aq} i_d}{H} & 0\end{bmatrix}^{-1}$$

从式（2.2-54）中可以看出，在系数矩阵 $\boldsymbol{A}$（或 $\boldsymbol{D}$）中含有待求变量 ω、i_d、i_q。因此，状态方程式（2.2-54）是非线性微分方程组，对此式的解算可用数值积分法，如龙格-库塔法等。

5.7　异步运行

异步运行是同步电机动态过程常出现的运行方式，如同步电机的起动、失磁运行、周期性振荡过程等。

异步起动时，励磁绕组通过外接电阻短路，派克方程为

$$\left.\begin{aligned} u_d &= \frac{d\Psi_d}{dt}-(1-s)\Psi_q - ri_d\\ u_q &= \frac{d\Psi_q}{dt}-(1-s)\Psi_d - ri_q\end{aligned}\right\} \tag{2.2-55}$$

当略去定子绕组电阻时，可得转差率为 s 时的平均电磁转矩的近似表达式

$$\begin{aligned} T_{em}=\frac{U^2}{2}\Bigg[&\left(\frac{1}{X'_d}-\frac{1}{X_d}\right)\frac{sT'_d}{1+(sT'_d)^2}+\\ &\left(\frac{1}{x''_d}-\frac{1}{x'_d}\right)\frac{sT''_d}{1+(sT''_d)^2}+\\ &\left(\frac{1}{x''_q}-\frac{1}{x_q}\right)\frac{sT''_q}{1+(sT''_q)^2}\Bigg]\end{aligned} \tag{2.2-56}$$

式中，T'_d、T''_d、T'_q 均为计及励磁绕组外接电阻后的时间常数。由式（2.2-56）可见，T_{em} 包括三项：第一项主要决定于励磁绕组中的感应电流；第二、三项则主要分别取决于直轴和交轴阻尼绕组中产生的电流。如果以 $s=1$ 代入式（2.2-51），则可得同步电动机的起动转矩；以 $s=0.05$ 代入，可得牵入转矩。

6　各种突然短路过程的解析解

突然短路是电机的一个重要瞬态现象，其主要特征是：

1）绕组中出现强大的冲击电流，其值可达到额定值的 10 倍或以上。

2）随着这一冲击电流的出现，电机的绕组端部将受到强大的冲击电磁力的作用，如其支固情况不良，可使线圈产生形变，乃至绝缘受到损伤。

3）突然短路过程中，在强大短路转矩的作用下，电机可能发生振动，而其结构部件，特别是轴颈部分和基础螺杆中，可出现很高的冲击机械应力。

4）定、转子绕组上出现过电压现象等。为了能恰当地选用开关和保护设备，以及计算电机有关部件的受力情况，必须知道同步电机在各种突然短路故障时的电流和转矩的性质及其数值大小。

6.1　三相突然短路

用 dq0 坐标系计算空载时的三相突然短路。

（1）三相突然短路时的定子电流

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

1）突然短路电流的初始值为

$$i_{a(3)}=\frac{E_m}{x''_d}\cos(t+\theta_0)-\frac{E_m}{2}\cos\theta_0\left(\frac{1}{x''_d}+\frac{1}{x''_q}\right)-\frac{E_m}{2}\cos(2t+\theta_0)\left(\frac{1}{x''_d}-\frac{1}{x''_q}\right) \tag{2.2-57}$$

2）电流的一般表达式为

$$i_{a(3)}=E_m\cos(t+\theta_0)\left[\left(\frac{1}{x''_d}-\frac{1}{x'_d}\right)e^{-t/T''_d}+\left(\frac{1}{x'_d}-\frac{1}{x_d}\right)e^{-t/T'_d}+\frac{1}{x_d}\right]-\frac{E_m}{2}e^{-t/T_a}\left[\left(\frac{1}{x''_d}+\frac{1}{x''_q}\right)\cos\theta_0+\left(\frac{1}{x''_d}-\frac{1}{x''_q}\right)\cos(2t+\theta_0)\right] \tag{2.2-58}$$

式中，θ_0 为发生突然短路时，转子 d 轴超前定子 A 相轴线的电角度。

电流中有五个成分：超瞬态、瞬态、稳态短路电流、非周期电流分量和二次谐波电流。

当 $\theta_0=0$，这时 A 相磁链 Ψ_a 最大，非周期电流分量最大；当 $\theta_0=90°$，$\Psi_a=0$，非周期电流分量为零。

（2）三相突然短路时的电磁转矩

$$T_{em(3)}=\frac{E''^2_m}{x''_d}F_e^{-t/T_a}\sin t+\frac{E''^2_m}{x''^2_d}F^2r+\frac{1}{2}E''^2_m\left(\frac{R_D}{x''^2_d}+\frac{R_Q}{x''^2_q}\right)e^{-2t/T_a}-\frac{E''^2_m}{2}\left(\frac{1}{x''_d}-\frac{1}{x''_q}\right)e^{-2t/T_a}\sin 2t$$
$$=T_{(基频)}+T_{(定子电阻)}+T_{(转子电阻)}+T_{(倍频)} \tag{2.2-59}$$

$$F=\left(1-\frac{x''_d}{x'_d}\right)e^{-t/T''_d}+\left(\frac{x''_d}{x'_d}-\frac{x''_d}{x_d}\right)e^{-t/T'_d}+\frac{x''_d}{x_d}$$

$$R_D=\frac{(x_d-x'_d)T'_{d0}}{1+T'^2_{d0}}$$

$$R_Q=\frac{(x_q-x''_q)T''_{q0}}{1+T''^2_{q0}}$$

三相突然短路时的转矩有四个成分，即基频转矩，定子电阻铜耗和转子电阻铜耗引起的单向转矩，d、q 轴磁阻不等引起的倍频转矩。

6.2 两相突然短路

定子和转子都不对称时，用 αβ0 坐标系统解算，如图 2.2-21 所示。

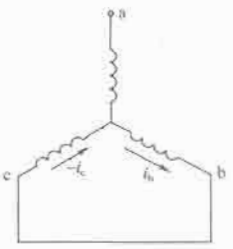


图 2.2-21 两相突然短路

（1）两相突然短路时的定子电流

1）突然短路电流的初始值为

$$i_{b(2)}=\frac{\sqrt{3}E_m}{x''_d+x_2}(\sin\theta-b\sin3\theta+b^2\sin5\theta+\cdots)-\frac{\sqrt{3}E_m\sin\theta_0}{x_2}(0.5-b\cos2\theta+b^2\cos4\theta-b^3\cos6\theta+\cdots) \tag{2.2-60}$$

2）电流的一般表达式为

$$i_{b(2)}=\sqrt{3}E_m\left[\left(\frac{1}{x''_d+x_2}-\frac{1}{x'_d+x_2}\right)e^{-t/T''_{d2}}+\left(\frac{1}{x'_d+x_2}-\frac{1}{x_d+x_2}\right)e^{-t/T'_{d2}}+\frac{1}{x_d+x_2}\right]\times[\sin\theta-b\sin3\theta+b^2\sin5\theta+\cdots]-\sqrt{3}E_m\frac{\sin\theta_0}{x_2}e^{-t/T_{a2}}[0.5-b\cos2\theta+b^2\cos4\theta-b^3\cos6\theta+\cdots] \tag{2.2-61}$$

$$b=\frac{\sqrt{x''_q}-\sqrt{x''_d}}{\sqrt{x''_q}+\sqrt{x''_d}}$$

$$\theta=t+\theta_0$$

$$x_2=\sqrt{x''_d x''_q}$$

两相突然短路电流中有三个分量：即非周期电流分量、奇次谐波电流分量和偶次谐波分量。当 $\theta_0=0$ 时，电流中的非周期分量和偶次谐波电流分量不出现；当 $\theta_0=90°$ 时，以上两个分量为最大。

（2）两相突然短路时的开路相电压

两相突然短路时，开路相出现的电压最大瞬时值

$$u_a=E_m\left(2\frac{x''_q}{x''_d}-1\right) \tag{2.2-62}$$

在没有阻尼绕组的凸极电机中，$x''_d=x'_d$，$x''_q=x_q$，而 $x_q/x'_d\approx2\sim3$，因而，即 $U_{a(max)}\approx(3\sim5)E_m$，即会出现很高的过电压。如果电机的中性点未接地，而在故障发生点接地，开路相对地的电压还会提高 50%。在具有很强的阻尼绕组效果的同步电机里，$x''_d=x''_q$，故 $U_{a(max)}\approx E_m$，将不会产生过电压。

（3）两相突然短路时的电磁转矩

当只考虑其基频分量时，有

$$T_{em(2)}=\frac{-2E''^2_m}{x''_d+x_2}F_2e^{-t/T_a}\sin\theta_0\cos\theta \tag{2.2-63}$$

$$F_2=\left(1-\frac{x''_d+x_2}{x'_d+x_2}\right)e^{-t/T''_{d2}}+\left(\frac{x''_d+x_2}{x'_d+x_2}-\frac{x''_d+x_2}{x_d+x_2}\right)e^{-t/T'_{d2}}+\frac{x''_d+x_2}{x_d+x_2}$$

6.3 单相对中性点突然短路

这时定、转子都不对称，可采用 αβ0 坐标系解算，如图 2.2-22 所示。

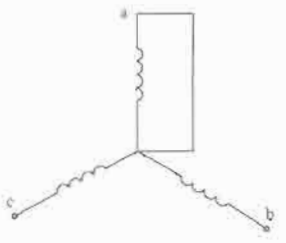


图 2.2-22 单相对中性点突然短路

（1）定子电流

1）突然短路电流的初始值为

$$i_{a(1)}=\frac{3E_m}{x''_d+x_2+x_0}(\cos\theta+b\cos3\theta+b^2\cos5\theta+\cdots)-\frac{3E_m\cos\theta_0}{x_2+0.5x_0}(0.5+b\cos2\theta+b^2\cos4\theta+\cdots) \tag{2.2-64}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2）电流的一般表达式

$$i_{a(1)}=3E_m\left[\left(\frac{1}{x''_d+x_2+x_0}-\frac{1}{x'_d+x_2+x_0}\right)e^{-t/T''_{d1}}+\left(\frac{1}{x'_d+x_2+x_0}-\frac{1}{x_d+x_2+x_0}\right)e^{-t/T'_{d1}}+\frac{1}{x_d+x_2+x_0}\right](\cos\theta+b\cos3\theta+b^2\cos5\theta+\cdots)-\frac{3E_m\cos\theta_0}{x_2+0.5x_0}e^{-t/T_{a1}}\times(0.5+b\cos2\theta+b^2\cos4\theta+\cdots)\quad(2.2\text{-}65)$$

$$b=\frac{\sqrt{x''_q+\frac{x_0}{2}}-\sqrt{x''_d+\frac{x_0}{2}}}{\sqrt{x''_q+\frac{x_0}{2}}+\sqrt{x''_d+\frac{x_0}{2}}}$$

$$x_2=\sqrt{\left(x''_d+\frac{x_0}{2}\right)\left(x''_q+\frac{x_0}{2}\right)}-\frac{x_0}{2}$$

同样，单相突然短路电流中也含有非周期分量以及一系列奇偶次谐波电流分量。

3）单相突然短路电流与两相和三相突然短路电流的比较：

① 通常 $x_0\ll x''_d$，若 $x_0=0$，则 $i_{a(1)}=\sqrt{3}i_{b(2)}$。

② 若 $x''_q\approx x''_d$，则 $i_{a(1)}\approx1.5i_{a(3)}$。

③ 若电机中性点通过一个大得足够使 $x_0\approx x''_d$ 的电抗器接地，则单相突然短路电流可以被限制为三相突然短路电流值的水平。

（2）电磁转矩

当只考虑基频分量时，有

$$T_{em(1)}=\frac{2E_m^2}{x''_d+x_2+x_0}F_1e^{-t/T_{a1}}\cos\theta_0\sin\theta\quad(2.2\text{-}66)$$

$$F_1=\left(1-\frac{x''_d+x_2+x_0}{x'_d+x_2+x_0}\right)e^{-t/T''_{d1}}+\left(\frac{x''_d+x_2+x_0}{x'_d+x_2+x_0}-\frac{x''_d+x_2+x_0}{x_d+x_2+x_0}\right)\times e^{-t/T'_{d1}}+\frac{x''_d+x_2+x_0}{x_d+x_2+x_0}$$

（3）开路相电压

当发生短路时，$\theta_0=0$，开路相的电压将出现最大值，其值为

$$u_{b(max)}=\sqrt{3}E_m\left[\frac{2\left(x''_q+\frac{x_0}{2}\right)}{x''_d+\frac{x_0}{2}}-1\right]\quad(2.2\text{-}67)$$

6.4　突然短路的冲击电流和冲击转矩

（1）冲击电流

为计算载流部件之间的相互作用的电磁力，需要知道最大短路电流的瞬时值，即短路冲击电流。它出现在短路开始后的 1/2 周期时（即 $t=0.01$s），其值等于该点瞬间短路的周期分量和非周期分量之和。如果电机加了中性点接地电抗，则最大短路电流出现在三相突然短路时。若不考虑 0.01s 时间内的基波分量的瞬时值的变化，则短路冲击电流的幅值为

$$i_{kmax}=E_m\left[\left(\frac{1}{x''_d}-\frac{1}{x'_d}\right)e^{-t/T''_d}+\left(\frac{1}{x'_d}-\frac{1}{x_d}\right)e^{-t/T'_d}+\frac{1}{x_d}+\frac{1}{x''_d}e^{-t/T_a}\right]_{t=0.01}\quad(2.2\text{-}68)$$

（2）短路冲击转矩

突然短路时会产生巨大的冲击电磁转矩，其中单向分量对应于定子和转子中的短路电流所产生的铜损耗，其值较小；但脉振转矩分量十分大，会在电机有关部件及基础固定件中产生巨大应力，还可能导致电机产生剧烈振动。当短路瞬间短路相磁链达到最大值时，将出现最大脉振转矩的 6 倍（凸极电机），或 10 倍（四极隐极汽轮发电机），或 14 倍（两极汽轮发电机）。最大脉振基波转矩幅值为：

1）三相突然短路时

$$T_{em(冲击)}=\frac{E_m^2}{x''_d}\quad(2.2\text{-}69)$$

2）两相突然短路时

$$T_{em(冲击)}=\frac{\frac{3}{2}\sqrt{3}E_m^2}{x''_d+x_2}\left[1+2.44\left(\frac{x_2-x''_d}{x_2+x''_d}\right)\right]\quad(2.2\text{-}70)$$

3）单相突然短路时

$$T_{em(冲击)}=\frac{\frac{3}{2}\sqrt{3}E_m^2}{x''_d+x_2+x_0}\left[1+2.44\left(\frac{x_2-x''_d)}{x_2+x''_d+x_0}\right)\right]\quad(2.2\text{-}71)$$

6.5　突然短路的负序电抗和时间常数

（1）负序电抗

三相短路时

$$x_2=\frac{2x''_dx''_q}{x''_d+x''_q}\quad(2.2\text{-}72)$$

两相短路时

$$x_2=\sqrt{x''_dx''_q}\quad(2.2\text{-}73)$$

单相短路时

$$x_2=\sqrt{\left(x''_d+\frac{x_0}{2}\right)\left(x''_q+\frac{x_0}{2}\right)}-\frac{x_0}{2}\quad(2.2\text{-}74)$$

（2）非周期电流分量和偶次谐波电流分量的衰减时间常数

三相短路时的

$$T_a=\frac{x_2}{T}=\frac{2x''_dx''_q}{r(x''_d+x''_q)}\quad(2.2\text{-}75)$$

两相短路时的

$$T_{a2}=\frac{2x_2}{2r}=\frac{\sqrt{x''_dx''_q}}{r}\quad(2.2\text{-}76)$$

单相短路时的

$$T_{a1}=\frac{2\sqrt{\left(x''_d+\frac{x_0}{2}\right)\left(x''_q+\frac{x_0}{2}\right)}}{3(r+r_g)}\quad(2.2\text{-}77)$$

式中，r_g 为接地电抗器的电阻。

（3）超瞬态和瞬态电流衰减时间常数

1）定子绕组开路，励磁绕组的时间常数 T''_{d0} 见式（2.2-46）。

2）定子绕组开路，励磁绕组短路时直轴阻尼绕组的时间常数 T''_{d0} 见式（2.2-46）。

3）三相突然短路时的 T''_d 和 T'_d 见式（2.2-47）或分别为

$$T''_d=T''_{d0}\frac{x''_d}{x'_d}\quad(2.2\text{-}78)$$

$$T'_d=T'_{d0}\frac{x'_d}{x_d}\quad(2.2\text{-}79)$$

4）两相突然短路时的 T''_{d2} 和 T'_{d2} 分别为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$T''_{d2}=T''_{d0}\frac{x''_d+x_2}{x'_d+x_2} \tag{2.2-80}$$

$$T'_{d2}=T'_{d0}\frac{x'_d+x_2}{x_d+x_2} \tag{2.2-81}$$

式中，x_2 用式（2.2-73）代入。

5）单相突然短路时 T''_{d1} 和 T'_{d1} 分别为

$$T''_{d1}=T''_{d0}\frac{x''_d+x_2+x_0}{x'_d+x_2+x_0} \tag{2.2-82}$$

$$T'_{d2}=T'_{d0}\frac{x'_d+x_2+x_0}{x_d+x_2+x_0} \tag{2.2-83}$$

式中，x_2 用式（2.2-74）代入。

7 振荡

励磁调节器及调速器失控或发生故障，原动机转矩或负载的阻力矩不均匀以及外部负荷不稳定。此外，电网中变流装置产生的波形畸变，轴承油膜振荡以及网机联合振荡等，都可以导致同步电机发生振荡现象。振荡时，同步电机的转速、电流、电压、功率以及转矩等均发生周期性的变化。这些量的振荡振幅甚至可能达到危险的数值。因此，同步电机的振荡对它本身以及与它相关的电网、电器和其他电机等是不利的，严重时会造成同步电机与电力系统失去同步。为防止振荡，应采取有效措施，例如，转子装设阻尼绕组，加大机组转动惯量以及装设适当的保护装备等。

振荡有自由振荡和强制振荡两类。前者是由外界干扰引起电机功角的初始偏差而造成的，一般均能衰减。后者是由于原动机转矩或负载阻力矩不均匀或成周期性的变化造成的，它是持续的，应限制其振荡幅值并防止产生机械扭振和机电共振。

7.1 振荡转矩

（1）小值振荡时发电机的各种转矩

1）由原动机输入的转矩

$$T_1=T_{av}+\sum_{\nu=1}^{\infty}T_\nu\cos(\nu\Omega_1 t+\psi_\nu) \tag{2.2-84}$$

式中，T_{av} 为原动机平均转矩；T_ν 为原动机转矩中的 ν 次谐波分量的幅值；ν 为原动机谐波转矩的级次，与原动机类型有关；ψ_ν 为原动机转矩的初相角；Ω_1 为发电机转子的同步转速。

2）发电机电磁转矩

$$\begin{aligned}T_{em}&=\frac{mE_0U}{\Omega_1 x_d}\sin(\theta_0+\alpha)\\&\approx\frac{mE_0U}{\Omega_1 x_d}\sin\theta_0+\left(\frac{mE_0U}{\Omega_1 x_d}\cos\theta_0\right)\alpha\\&=T_{em0}+T_{syn}\alpha\end{aligned}$$

式中，θ_0 为发电机功角；α 为小值振荡角；T_{em0} 为发电机电磁转矩的稳态分量；T_{syn} 为整步转矩。

3）阻尼转矩 T_D。表示发电机阻尼系数的阻尼比例，其值为

$$T_D=K_D\frac{d\alpha}{dt} \tag{2.2-85}$$

式中，K_D 为阻尼转矩系数，与阻尼系统的电阻成比例。

4）运动转矩

$$T_J=J\frac{d\Omega}{dt}=\frac{J}{p}\frac{d^2\alpha}{dt^2} \tag{2.2-86}$$

式中，J 为机组转动惯量，$J=GD^2/4$；p 为极对数。

（2）振荡时转矩平衡方程

由原动机输入发电机的平均转矩 T_{av} 与发电机电磁转矩中的稳定项 T_{em0}，在振荡终了时是互相平衡的，所以可列出振荡时的转矩平衡方程（或称转子运动方程）如下

$$\frac{J}{p}\frac{d^2\alpha}{dt^2}+K_D\frac{d\alpha}{dt}+T_{syn}\alpha=\sum_{1}^{n}T_\nu\cos(\nu\Omega_1 t+\psi_\nu) \tag{2.2-87}$$

7.2 自由振荡和强制振荡

（1）并网运行时的衰减自由振荡

此种振荡的条件与转子运动方程见表 2.2-8。

表 2.2-8 衰减的自由振荡

条 件	同步电机与电网并联运行，且原动机输入均匀的转矩（即 $T_\nu=0$）
转子运动方程	$\frac{J}{p}\frac{d^2\alpha}{dt^2}+K_D\frac{d\alpha}{dt}+T_{syn}\alpha=0$ 或 $\frac{d^2\alpha}{dt^2}+2\delta_0\frac{d\alpha}{dt}+\omega_0^2\alpha=0$
振荡角	$\alpha=\frac{\alpha_m e^{-\delta_0 t}}{\sqrt{1-(\delta_0/\omega_0)^2}}\cos(\sqrt{\omega_0^2-\delta_0^2}t-\gamma)\gamma=\arctan(\delta_0/\sqrt{\omega_0^2-\delta_0^2})$
自由振荡角频率	$\omega_a=\sqrt{\omega_0^2-\delta_0^2}=\sqrt{T_{syn}p/J-(K_Dp/2J)^2}$
振荡周期	$T_a=2\pi/\omega_a$
衰减系数	$\delta_0=K_Dp/2J$
不考虑阻尼时的自由振荡角频率	$\omega_0=\sqrt{T_{syn}p/J}$，$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{T_{syn}p/J}$

由 α 及 δ_0 的表达式可见，要使振荡发生后迅速衰减，同步电机应有一定的阻尼系统。如果阻尼作用太弱，并网运行时比较容易出现运行不稳定的现象。

（2）强制振荡

无论与电网并联运行或单机运行，只要由原动机输入的转矩或轴上的机械负载的阻力矩不均匀（即呈周期性变化时），同步电机都处于强制振荡状态，但两者的转子运动方程是不同的。

1）并网时的强制振荡。此时的转子运动方程即是式（2.2-87），其解为

$$\alpha=\sum_{\nu=1}^{\infty}\frac{T_\nu}{\sqrt{(\nu\Omega_1K_D)^2+\left(\nu^2\Omega_1^2\frac{J}{p}-T_{syn}\right)^2}}\times\sin(\nu\Omega_1 t-\varphi_\nu-\varphi_\nu) \tag{2.2-88}$$

在具有阻尼的条件下，当（$\nu^2\Omega_1^2J/p-T_{syn}$）$=0$ 时，α 将达到最大值；而当 $K_D=0$ 时，α 将达到无穷大，也就是发生了共振现象，这类情况都可能使发电机失去同步，因此应当防止

$$\nu\Omega_1=\sqrt{\frac{T_{syn}p}{J}} \tag{2.2-89}$$

即应当避免同步电机不考虑阻尼时的自由振荡频率 ω_0 与原动机（或负载机械）不均匀转矩中的任一次谐波分量的振荡频率相互接近到±20%及以内。必要时，应调整机组的转动惯量 J 以改变 ω_0；同时适当加强阻尼，以提高 K_D，降低振荡强度。

2）单机运行时的强制振荡。这时同步电机的电压 U、频率 f 均不受约束，电压 U 和电动势 E_0 一起振荡，功角 θ_0 几乎不变，所以转子运动方程没有 $T_{syn}\alpha$ 和 $K_Dd\alpha/dt$ 两项，而变为

$$\frac{J}{p}\frac{d^2\alpha}{dt^2}=\sum_{\nu=1}^{\infty}T_\nu\cos(\nu\Omega_1 t+\psi_\nu) \tag{2.2-90}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

其解为

$$\alpha = -\sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{\rho}{J} \frac{T_\nu}{(\nu\Omega_1)^2} \cos(\nu\Omega_1 t + \psi_\nu)$$

由 ν 次谐波转矩引起的振幅值为

$$\alpha_{m\nu} = \frac{\rho}{J} \frac{T_\nu}{(\nu\Omega_1)^2}$$

由于它与 ν^2 成反比，故由二次以上的谐波转矩引起的振荡很小。这样，计算最大振荡角 α_m 时，可以只考虑低次谐波振荡幅值的代数和。

单机运行的同步电机，由于强制振荡而发生频率和端电压振荡，对用户的电动机影响不大，但使灯光闪烁。经验表明，当 $\alpha_m > 3°$ 时，人眼将感到光闪。故当发电机提供给照明负荷时，应限制机组角速度的不均匀度不超过允许值，其措施是机组应有足够的转动惯量。

7.3　定子电阻的影响

阻尼转矩系数 K_D 是随着定子电阻的增加而减小的，并且当定子电阻超过一定值（某一临界电阻值 R_{cr}）后，K_D 将可能变为负值。由振荡角 α 的表达式（表 2.2-8）可知，当 K_D 为负值时，α 不仅不衰减，而且将周期性地增大，以致最终使同步电机失去同步，此即所谓的摆脱现象。临界电阻 R_{cr} 的值不是恒定的，在一定的励磁条件下，负载越轻，R_{cr} 越小，电机越容易发生振荡及不稳定现象，故无阻尼绕组的同步发电机是不宜作为同步调相机使用的。

装设阻尼绕组，特别是交轴阻尼绕组具有使 K_D 及 R_{cr} 增大的作用，因此，它对限制振荡振幅是十分有利的。

8　特性参数

特性参数是指那些可以说明电机及其工作特性所必需的参数，它们是绕组的电感、电阻、电抗和时间常数。

（1）电感

同步电机的定子绕组是对称的交流绕组，但转子不对称，也即磁路不对称，相应的各绕组的自感、互感以及漏感的计算公式见表 2.2-9。

表 2.2-9　　电感的计算公式

电枢绕组的主电感、漏感、自感	备　注
$L_{ad} = \frac{3}{2}\Lambda N_a^2 C_{d1} K_{dp1}^2$ $L_{aq} = L_{ad}\frac{C_{q1}}{C_{d1}}$（凸极电机） $L_{aq} = L_{ad}\frac{1}{K_{cr}}$（隐极电机） $L_{a\sigma} = 2\mu_0 \frac{l'}{p}\frac{N_a^2}{q_a}(\sum \Lambda_a)$ $L_d = L_{ad} + L_{a\sigma}$ $L_q = L_{aq} + L_{a\sigma}$	电机主磁导　$\Lambda = \frac{4}{\pi}\mu_0 \frac{D_i l'}{2p^2\delta_i}$ 绕组系数（基波） 凸极电机　$\xi_{f1} = \sin\left(\frac{b_f}{\tau_r}\frac{\pi}{2}\right)$ $\xi_{D1} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\frac{\sin\left(\frac{t_D}{\tau_r}q_D\pi\right)}{\frac{t_D}{\tau_r}q_D\pi}$ $\xi_{Q1} = 1 - \xi_{D1}$ 隐极电机　$\xi_{f1} = \frac{\sin\left(\frac{t_f}{\tau_r}q_f\frac{\pi}{2}\right)}{q_f\sin\left(\frac{t_f}{\tau_r}\frac{\pi}{2}\right)}$ $\xi_{D1} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\frac{\sin\left(\frac{t_f}{\tau_r}q_f\pi\right)}{q_f\sin\left(\frac{t_f}{\tau_r}\pi\right)}$ $\xi_{Q1} = 1 - \xi_{D1}$ 凸极电机 d 轴基波磁场幅值系数 $C_{d1} = \frac{b_f}{\tau_r} + \frac{1}{\pi}\sin\left(\frac{b_f}{\tau_r}\pi\right)$ 凸极电机 q 轴基波磁场幅值系数 $C_{q1} = \frac{b_f}{\tau_r} - \frac{1}{\pi}\sin\left(\frac{b_f}{\tau_r}\pi\right)$ $\sum \Lambda_a$— 电枢绕组漏磁导 $\sum \Lambda_f$— 励磁绕组漏磁导 $\sum \Lambda_D$— 阻尼绕组漏磁导 μ_0— 空气磁导率 l'— 电机有效长度 p— 极对数 K_{cr}— 计及转子开槽的卡特系数 N_a— 定子绕组每相串联匝数 N_f— 励磁线圈总匝数 N_D— 等效阻尼绕组匝数 q_a— 定子每极每相槽数 q_f— 转子每极槽数，对于凸极 $q_f = 1$ q_D— 每极阻尼槽数 D_i— 定子铁心内径 δ_i— 气隙有效长度 b_f— 凸极电机极弧宽 τ_r— 转子极距 t_D— 阻尼槽槽距 t_f— 隐极电机转子槽距
励磁绕组的漏感、自感	
$L_{f\sigma} = 2\mu_0 \frac{l'}{p}\frac{N_f^2}{q_f}(\sum \Lambda_f)$ $L_f = \Lambda N_f^2 \xi_{f1}^2 + L_{f\sigma}$	
阻尼绕组的漏感、自感	
$L_{D\sigma} = 2\mu_0 \frac{l'}{p}\frac{N_D^2}{q_D}\xi_{D1}(\sum \Lambda_D)$ $L_{Dd} = 2\mu_0 \frac{l'}{p}\frac{N_D^2}{q_D}\xi_{Q1}(\sum \Lambda_D)$（凸极） $L_{Dq} = 2\mu_0 \frac{l'}{p}\frac{N_D^2}{q_D}K_{cr}\xi_{Q1}(\sum \Lambda_D)$（隐极） $L_D = \Lambda N_D^2 \xi_{D1}^2 + L_{D\sigma}$ $L_Q = \Lambda N_D^2 \xi_{Q1}^2 C_{q1} + L_{Dq}$	
电枢绕组与阻尼绕组间的互感	
$L_{ad} = L_{fd} = \sqrt{\frac{3}{2}}\Lambda N_a N_D \xi_{a1}\xi_{D1}$ $L_{aQ} = L_{aq} = \sqrt{\frac{3}{2}}\Lambda N_a N_D \xi_{a1}\xi_{Q1} C_{q1}$	
电枢绕组与励磁绕组间的互感	
$L_{af} = L_{fa} = \sqrt{\frac{3}{2}}\Lambda N_a N_f K_{dp1}\xi_{f1}$	
励磁绕组与阻尼绕组间的互感	
$L_{fD} = L_{Df} = \Lambda N_f N_D \xi_{f1}\xi_{D1}$	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

(2) 电抗

虽然双轴理论以电机的不饱和作为先决条件，但饱和在实际电机是存在的，故相应的电抗有不饱和值和饱和值之分。所谓不饱和值是电机在额定电流时的电抗值，而饱和值是电机在额定电压时的电抗值。表 2.2-9 所给电感定义乘以 ω 即可算得电抗的不饱和值。为便于比较，常以电抗的标么值表示，基值阻抗定义见表 2.2-7。各种电抗欧姆值、标么值的计算见表 2.2-10，其中大写 X 代表电抗的欧姆值，而小写 x 表示标么值。

表 2.2-10 同步电机的电抗

名 称	欧姆值	标么值(不饱和)	标么值(饱和)
基值阻抗	$Z_{(b)}=\frac{U_{(b)}}{I_{(b)}}$	—	—
直轴同步电抗	$X_d=\omega L_d$	$x_d=\frac{X_d}{Z_{(b)}}=\frac{K_\mu}{K_c}$	$x_{ds}=\frac{1}{K_c}$
交轴同步电抗	$X_q=\omega L_q$	$x_q=\frac{X_q}{Z_{(b)}}$	—
直轴瞬态电抗	$X'_d=\omega L'_d$	$x'_d=\frac{X'_d}{Z_{(b)}}$	$x'_{ds}=0.7x'_d$(隐极) $x'_{ds}=0.9x'_d$(凸极)
交轴瞬态电抗	$X'_q=X_q$	$x'_q=\frac{X'_q}{Z_{(b)}}$	—
直轴超瞬态电抗	$X''_d=\omega L''_d$	$x''_d=\frac{X''_d}{Z_{(b)}}$	$x''_{ds}=0.85x''_d$
交轴超瞬态电抗	$X''_q=\omega L''_q$	$x''_q=\frac{X''_q}{Z_{(b)}}$	—
定子绕组漏电抗	$X_\sigma=\omega L_\sigma$	—	—
保梯电抗	$X_p=X''_d$(隐极) $X_p=0.8x''_d$(凸极)	—	—
定子内孔电抗	$X_H=12\mu_0 f\frac{l'}{Z_1^2}N_s^2K_{dp1}^2$	—	—

注 1. 定子内孔电抗为抽出转子后，定子加交流电流，内腔中出现了一个内孔的旋转磁场所引起的电抗。

2. K_c—短路比；K_μ—额定电压时的饱和系数。

(3) 电阻（见表 2.2-11）

表 2.2-11 同步电机的电阻（欧姆值）

电 阻 名 称	表 达 式
电枢绕组的直流电阻	$R_s=\frac{1}{\rho_s}\frac{l_sN_s}{A_sa}$
励磁绕组的直流电阻	$R_f=\frac{1}{\rho_f}\frac{l_fN_f}{A_fa_f}$
直轴阻尼绕组的直流电阻	$R_D=\frac{1}{\rho_D}\frac{2l_D}{p q_D A_D}N_D^2\xi_{D1}k_D$
交轴阻尼绕组的直流电阻	$R_Q=\frac{1}{\rho_D}\frac{2l_D}{p q_D A_D}N_D^2\xi_{Q1}k_Q$
正序电阻	$R_1=\frac{P_{Cu1}+P_{Cu2}}{P_{(b)}}Z_{(b)}$
负序电阻	$R_2=R_1+\frac{X_2^2}{\omega}\left[\left(\frac{1}{X''_d}-\frac{1}{X'_d}\right)\frac{1}{T''_d}+\left(\frac{1}{X''_q}-\frac{1}{X'_q}\right)\frac{1}{T''_q}\right]$
零序电阻	$R_0=R_s$
备注 l_s—电枢绕组匝长 l_f—励磁绕组匝长 a—电枢绕组并联支路数 a_f—励磁绕组并联支路数 A_s—电枢绕组导体截面积 A_f—励磁绕组导体截面积 l_D—阻尼绕组导条长度 A_D—阻尼绕组导条截面积 A_R—阻尼环截面积	因阻尼环而使阻尼绕组电阻增大系数 $k_D=1+\frac{D_r}{l_D}$，$k_Q=k_D$(隐极电机) $k_D\approx1+\frac{4}{\pi^2}\frac{q_DA_D}{A_R}\frac{\tau_r}{l_D}\xi_{D1}$ $k_Q\approx1+\frac{4}{\pi^2}\frac{q_QA_D}{A_R}\frac{\tau_r}{l_D}\xi_{Q1}$ }(凸极电机) P_{Cu1}—电枢绕组基本铜损耗 P_{Cu2}—电枢绕组附加铜损耗

9 电磁参数的数值计算

电机是一种电磁装置。电磁装置中的电和磁都是以场的形式分布的。由于场分布的复杂性，采用解析或路的方法都无法给出准确描述。尽管传统的公式经过了一定的实践检验和不断修正，但考虑电机参数受饱和、运行工况的具体影响，为了准确地分析和考察电机的运行状态，还应采用数值技术对电磁场分布进行详细的求解，从而获得确定工况和饱和程度下的准确参数值。

9.1 运算电抗的计算方法

在转子零激励稳态异步运行条件下，同步电机的直交轴磁链可以导出为

$$\dot\Psi_d(js\omega)=-x_d(js\omega)\dot I_d$$

$$\dot\Psi_q(js\omega)=-x_q(js\omega)\dot I_q$$

由此可得

$$x_d(js\omega)=-\frac{\dot\Psi_d(js\omega)}{\dot I_d} \tag{2.2-91}$$

$$x_q(js\omega)=-\frac{\dot\Psi_q(js\omega)}{\dot I_q} \tag{2.2-92}$$

上式说明，同步电机的直、交轴运算电抗可以通过在电机的直、交轴上分别施加一个正弦磁动势，求解相应磁链的方式来进行计算。

取转差频率 $s=0$，可以获得直、交轴同步电抗的稳态值；取转差频率 $s=\infty$，可以获得直、交轴同步电抗的瞬态值或超瞬态值。

9.2 直、交轴涡流场计算

如上可知，运算电抗的数值计算可以归结为直交轴两个方向上的涡流场求解。

实际电机中，绕组是三相分布的，此时应如下计算三相电流，即

$$\begin{bmatrix}i_A\\i_B\\i_C\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta & 1\\ \cos(\theta-120^\circ) & -\sin(\theta-120^\circ) & 1\\ \cos(\theta-240^\circ) & -\sin(\theta-240^\circ) & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_d\\i_q\\i_0\end{bmatrix} \tag{2.2-93}$$

式中，$\theta=\omega_0 t$ 为系统的电角度。

在确定的直、交轴磁动势作用下，得到电机的二维似稳电磁场问题，即在一定角频率 ω 下，给定电机的饱和磁导率分布，得到一线性电磁场，假设线性场中的所有场量正弦变化，得如下的二维相量场模型

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial\dot A}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial\dot A}{\partial y}\right)=j\omega\sigma\dot A-\dot J_e \tag{2.2-94}$$

式中，μ 为材料的磁导率；单独通过饱和工作点的磁场计算来确定（见 9.3 节）；ω 为磁场变化的角频率，直、交轴磁场的转差频率；σ 为材料的电导率；J_e 为外施电流密度，由建立直、交轴磁动势的电流产生。

式 (2.2-94) 适用于整个求解场域，利用电机的边界条件和对称性可以确定最小求解场域。

涡流场计算中，需要注意对电机中的阻尼绕组和励磁绕组等根据不同的特点施加不同的约束，或采用适当的耦合技术。

9.3 饱和工作点的确定

按前述方法计算电机的运算电抗，首先需要取定电机的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

饱和工作点。对同步电机来说，电机的饱和工作点由三个因素来决定，即定子端电压、定子电流和电机的功率因数。这三个因素合并成为电机的端口约束条件。

根据电机的端口约束条件（U、I、$\cos\varphi$），采用与前面涡流场计算同样的有限元网格，可以进行饱和工作点的二维饱和磁场计算，具体计算步骤为：

1）根据已知的定子电流和功率因数确定场域中的定子电流分布，准确计算定子磁动势与转子磁极的夹角。

2）初设励磁电流，解二维电磁场计算定子感应电压及功率因数。

3）如果计算电压与给定电压不符，调整励磁电流后重新计算。

4）如果计算功率因数与给定功率因数不符，调整定子磁动势位置后，重新计算。

5）当计算定子电压和功率因数与初设值相符后，所得到的饱和磁场即为饱和工作点的磁场。

同步电机饱和工作点的各单元磁导率可直接用于二维线性涡流场的计算。

9.4　参数辨识法

参数计算的另一种方法是通过对相应系统的特定过程或特性曲线进行计算仿真，并根据得到的特性曲线进行辨识来实现。这种方式获得的参数与该过程的饱和状况相一致。如对同步电机的三相突然短路过程仿真可以计算电机各种电抗及时间常数。

对电机各种瞬态过程的仿真可采用瞬变电磁场的数值计算方法来进行。这种方法的特点类似于对电机特定过程的试验测试。由于借助于计算机的数值“试验”过程不存在真机的破坏性，故这种方法更灵活，可以对一些无法用真机试验所获得的过程来进行模拟。

以同步电机电抗的计算为例，当采用瞬变电磁场的方法对同步电机的瞬态过程进行仿真，获得三相突然短路特性曲线后，有关瞬态参数的测试就与相关的试验方法基本一致了（见 11.2 节）。

对电机一些特性曲线的计算，通常也采用稳态电磁场的各种数值方法。如对电机运算电抗频率特性的数值计算，可采用涡流场的相量方程来求解。通过复数有限元技术获得特性曲线后，就可以采用各种辨识技术，根据特性曲线的解析表达式来识别相应的参数了。

由特性曲线识别参数的过程也可以通过最小二乘法等数学工具来实现。

10　机网瞬态过程的数值仿真

电机作为电力系统的重要组成部分，其很多运行行为是与电网相互关联的。电机的动态过程要影响到电网，严重的会引起电网的系统振荡，甚至破坏；来自电网的系统波动同样也会引起电机的动态变化，直至故障损坏。这方面的实例国内外都已存在。对于大型发电机组，机网协调的问题已经日益引起人们的重视。

10.1　机网协调问题的分析

机网协调问题的分析不仅涉及电机本身的数学模型，同时也要考虑电力系统中相关的其他设备。因此，机网协调研究涉及面很宽。从电机设计与运行的角度，所关心的问题往往是以电机为中心，扩展到与电机相互作用影响较大的电力系统其他部分。

从学科分类角度，机网协调分析涉及电机本体部分的电机理论、电网部分的电力系统学科、控制调节部分的控制原理、转动轴系的机械动力学，以及变频整流部分的电力电子技术等，十分丰富。

目前，在机网动态系统分析方面已经形成了一些商业软件，如瑞士的 SIMSEN、加拿大的 EMTP 等。借助于这些软件，机网动态过程的分析可以较全面地考虑复杂的机网系统，获得一些综合分析的结果。下面给出一些机网系统的分析例子。

10.2　异步起动

实例电机为额定功率为 150MW 的同步发电电动机。其主要参数见表 2.2-12。

表 2.2-12　　同步电机的主要参数

额定容量（kVA）	17350
额定电压（V）	9750
额定频率（Hz）	50
极对数	2
额定转速（r/min）	1500
转动惯量（kg·m²）	1747
直轴同步电抗（标么值）	1.577
交轴同步电抗（标么值）	0.884

异步起动过程中，首先将电机的励磁绕组经电阻短接，然后将同步电机定子并入电网，此时电机的阻尼绕组所产生的异步转矩使机组起动并加速，在接近同步转速时，加上励磁电压将电机拉入同步。

所考虑的系统模型中包含了电机、变压器、传输线路、励磁回路、转子轴系及负载，其软件模型如图 2.2-23 所示。其中，VS 为由无穷大电网等效的三相交流电压源，LN 为线路阻抗，CB1 和 CB2 为三相开关，CB_R 和 CB_EX 为单相开关，T1 和 T2 为变压器，SM 为同步发电电动机，R 为励磁回路的电阻，VSEX 为励磁电源，ROT 为电机转子机械模型，PUMP 为负载（水泵）模型，F_PUMP 为负载转矩函数模块，SAT 为考虑铁心饱和引入的函数模块，VREG 为励磁调节函数模块，HYST 为控制开关动作的函数模块。

图 2.2-24 分别给出了电机转速、转矩、定子端电压及定子电流的仿真计算结果。从曲线可以看出该电机起动过程中由于起动电流大，引起了端电压的降低，同时尽管电磁转矩振荡较大，但转速上升相对平稳。这是由于电机的转动惯量较大所决定的。

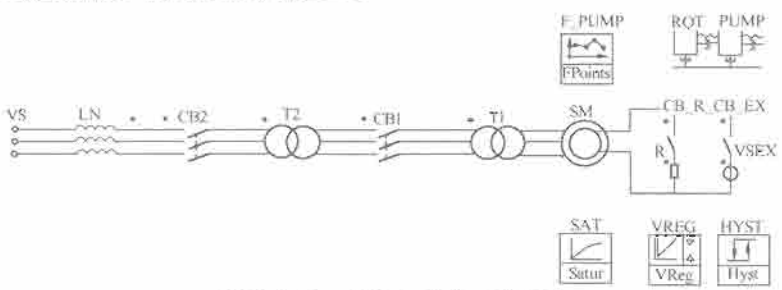


图 2.2-23　异步起动的系统模型

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

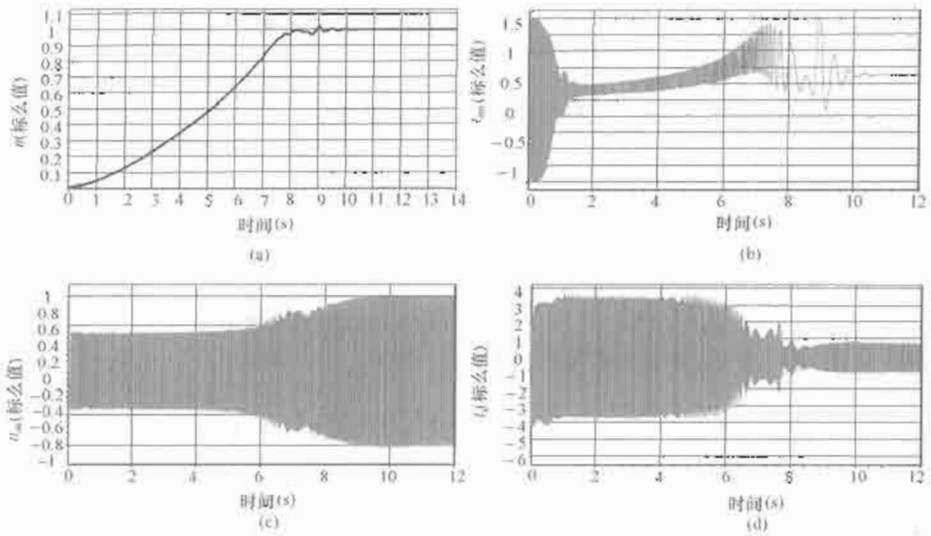


图 2.2-24 同步电机异步起动过程的仿真结果
(a) 起动转速随时间变化曲线；(b) 起动转矩随时间变化曲线；
(c) 相电压随时间变化曲线；(d) 相电流随时间变化曲线

10.3 背靠背起动

背靠背起动是抽水蓄能电站常用的起动方法。首先，将两台同步电机在电气上相连接，一台用作发电机，一台用作电动机。将发电机组的水轮机导叶逐渐开启，使发电机逐渐升速，此时发电机向电动机输出大小和频率逐渐上升的三相交流电。电动机在变频电压的作用下，产生同步电磁转矩，并在同步转矩作用下与定子电压频率同步，逐步升速。当转速达到80%额定转速时，投入发电机和电动机的励磁调节器，接近同步转速时将电动机并入电网，然后解除发电机。由此完成同步电动机的起动。

实例电机为一台抽水蓄能电站的同步发电电动机，其主要参数见表2.2-13。

表 2.2-13 同步电机的主要参数

额定容量（kVA）	334000
额定电压（V）	15750
额定频率（Hz）	50

续表

极对数	12
额定转速（r/min）	250
转动惯量（kg·m²）	4.908×10^6
直轴同步电抗（标么值）	1.084
交轴同步电抗（标么值）	0.669

图2.2-25所示为同步电机背靠背起动过程的系统仿真模型。其中，GRID为表征无穷大电网的交流电源，MAIN_TR为主变压器，CB1、CB2、CB3和CB4为三相开关，LINE1、LINE2、LINE3、LINE4和LINE5为线路阻抗，GEN和MOTOR分别为发电机和电动机，EXC1和EXC2分别为发电机和电动机的励磁电源，ROT_G和ROT_M分别为两机组的转子，TURBINE和PUMP分别为水轮机和水泵，T_TURB和T_PUMP分别为水轮机的输入转矩和水泵的负载转矩函数模块。

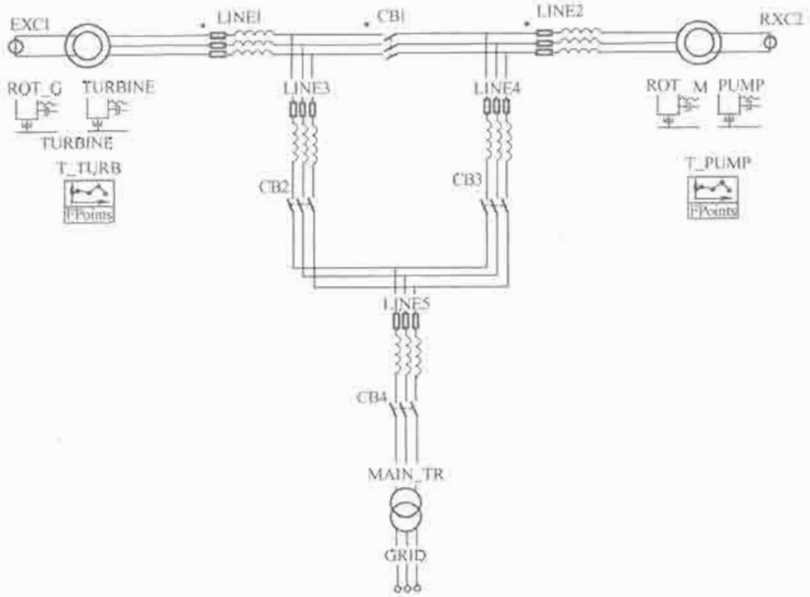


图 2.2-25 背靠背起动过程的系统仿真模型

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

按图 2.2-25 所示系统仿真模型，经初始化（确定整个系统的初始条件），进行背靠背过程的仿真计算，可以得到图 2.2-26 所示的仿真结果。从图中可以看到电动机起动、并网过程各物理量的变化情况。

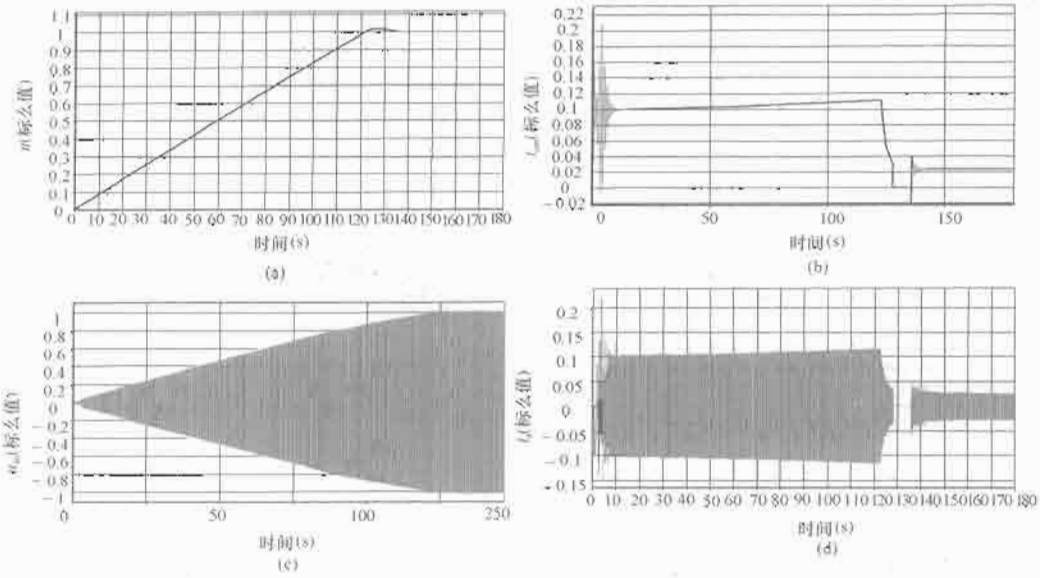


图 2.2-26　同步电机背靠背起动过程的仿真结果

（a）起动转速随时间变化曲线；（b）起动转矩随时间变化曲线；

（c）相电压随时间变化曲线；（d）相电流随时间变化曲线

10.4　变频器起动

目前，绝大部分抽水蓄能电站的发电电动机是采用变频器起动的。采用变频器起动方式起动时，被起动机组加空载额定励磁电流，投入变频器电源侧开关，通过位置传感器输出转速信号及位置信号，由变频器的控制装置调整晶闸管的导通角，由此来进行转速控制，待机组转速升至额定值时，将机组并网同时切除变频器。

实例电机的主要参数见表 2.2-14。

表 2.2-14　　实例电机参数

额定容量（kVA）	334000
额定电压（V）	15750
额定频率（Hz）	50
极对数	12
额定转速（r/min）	250
转动惯量（kg·m²）	4.908×10⁸
直轴同步电抗（标么值）	1.084
交轴同步电抗（标么值）	0.669

图 2.2-27 所示为所研究同步电机变频器起动过程的系统仿真模型。其中，VS1 为表征无穷大电网的交流电源，T1 为主变压器，SM1 为待起动的同步电机，CB1、CB2、CB3 和 CB4 为三相开关。ICONVER 和 ICONVM 为低速时脉冲步进方式所采用的整流器和逆变器模块；CONVR 和 CONVM 为高速时所采用的整流器和逆变器模块（LCI），L1 和 L2 为直流环节的平波电感，EXC 和 EXC1 为电机的励磁电源，ROT 为电机的转子，PUMP 为电机的负载（水泵）模型，T _ PUMP为负载转矩函数模块，REGIEXC为

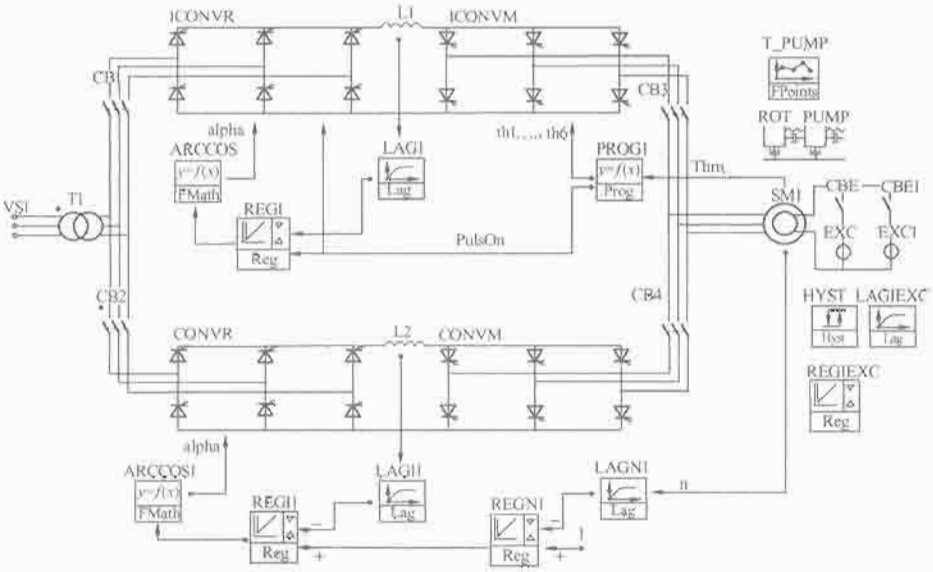


图 2.2-27　同步电机变频器起动过程的系统仿真模型

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

励磁调节函数模块，HYST 为控制开关动作的函数模块，用于低、高速两个变频模型之间的切换（注意低、高速的变频装置模型分成两部分，纯粹是从软件编程的需要考虑。实际的变频装置是两者合一的）。另外，系统模型还包括一些控制模块，ARCCOS 和 ARCCOS1 为调整整流器导通角的函数模块，LAG1、LAG11、LAGN1 及 LAGIEXC 为滤波器模块，分别对两组变频器电感中的电流、电机的转速及励磁电流进行滤波，REG1、REG11、REGN1 为调节器，PROG1 为时序编程模块，通过输入电机转子位置角度来控制晶闸管的触发顺序。

注意图中有两套桥式整流逆变电路并联向同步电机供电，其中一套用以模拟起动初期的脉冲步进起动方式，另一套用以模拟负载换流逆变器（LCI）起动的全过程。两者通过模块 HYST 控制切换。

按图 2.2-27 所示系统仿真模型可以得到图 2.2-28 所示的仿真结果。

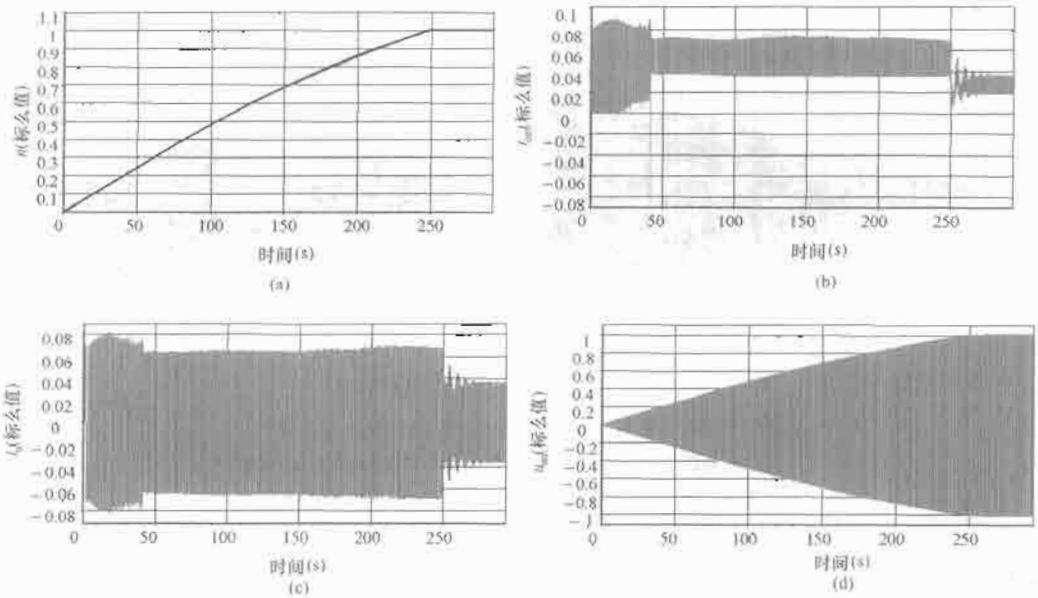


图 2.2-28 同步电机变频器起动仿真结果

（a）起动转速随时间变化曲线；（b）电磁转矩随时间变化曲线；
（c）相电流随时间变化曲线；（d）相电压随时间变化曲线

10.5 误同期并网

当同步发电机的感应电动势与电网电压相位不同时把发电机投入并联就叫做误同期并网。研究不同相位差情况下的误同期并网具有十分重要的工程意义。

实例电机的主要参数见表 2.2-15。

表 2.2-15 电机的主要参数

额定容量（kVA）	666667
额定电压（V）	20000
额定频率（Hz）	50
极对数	1
额定转速（r/min）	3000
直轴同步电抗（标么值）	2.0858
交轴同步电抗（标么值）	2.04897

汽轮发电机的转子轴系等效为多质量弹簧系统，各质量块的转动惯量以及相邻质量块之间的弹性系数如下给出：

从高压缸、中压缸、低压缸 1、低压缸 2、发电机、励磁机的顺序排列，各部分的转动惯量（$kg \cdot m^2$）依次为

$J_1=1326$，$J_2=2437$，$J_3=22755$，$J_4=23138$，$J_5=8997$，$J_6=588$

相应地，各相邻质量块之间的弹性系数（10^6NM/rad）依次为

$K_1=3.71$，$K_2=7.93$，$K_3=116$，$K_4=131$，$K_5=17.7$

所研究系统的软件模型如图 2.2-29 所示。其中，VS1 为表征无穷大电网的交流电源，LN1 为线路阻抗，T1 为变压器，CB1 为控制开关，SM1 为汽轮发电机，EXC 为励磁电压，RESULTS 为输出结果模块。轴系各质量模块分别为：励磁机 E，发电机 G，低压缸 LP1 和 LP2，中压缸 IP，高压缸 HP。

按图 2.2-29 所示的仿真模型，经过对系统的仿真计算可以得到发电机在误同期并网时的各种性能曲线。图 2.2-30 和图 2.2-31 分别给出了电机在 120°和 180°误同期并网时的电流、电磁转矩及轴力矩随时间变化的曲线。表 2.2-16 给出了不同误差角并网时电流及各部分扭矩最大值计算结果。从表中可见，在 120°误同期时，电机的转矩冲击最大。我国机械工业行业标准《透平型发电机非正常运行工况设计和运行导则》（JB/T 10499—2005）规定，汽轮发电机在保证寿命期内应承受 120°误同期 2 次。

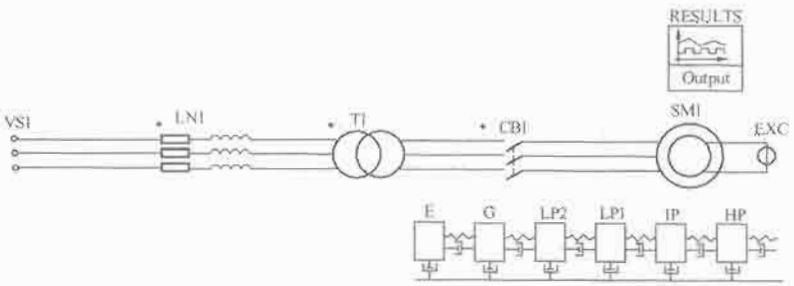


图 2.2-29 600MW 汽轮发电机的仿真模型

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

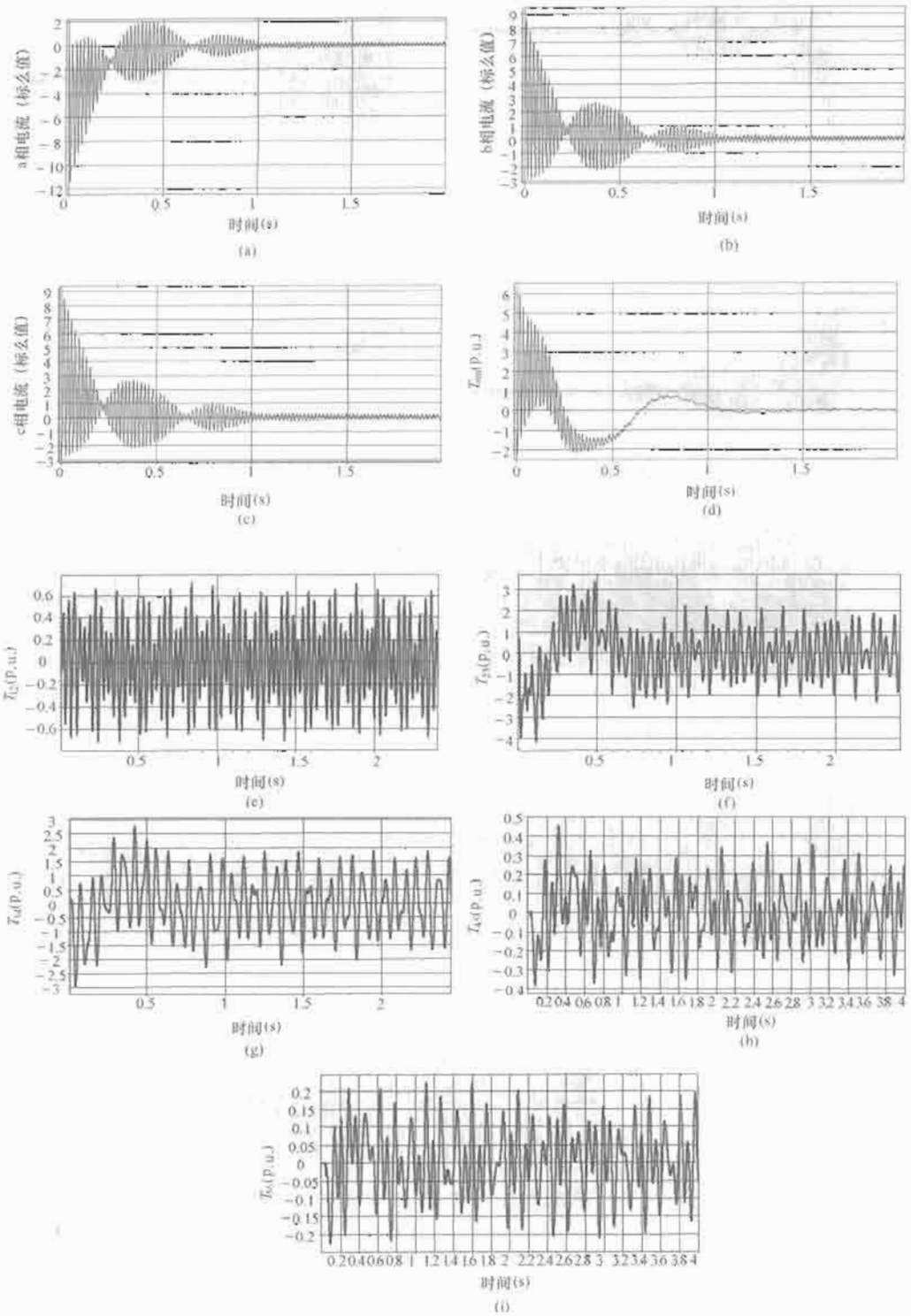


图 2.2-30　600MW 汽轮发电机 120°误差角并网

(a) a 相电流；(b) b 相电流；(c) c 相电流；(d) 电磁转矩；(e) 励磁机与发电机之间的轴力矩；(f) 发电机与低压缸之间的轴力矩；(g) 两个低压缸之间的轴力矩；(h) 低压缸与中压缸之间的轴力矩；(i) 中压缸与高压缸之间的轴力矩

表 2.2-16　不同误差角并网时的计算结果

角度	I	T_{em}	T_{12}	T_{23}	T_{34}	T_{45}	T_{56}
30°	3.32	2.54	0.36	2.12	1.50	0.24	0.13
60°	6.18	4.57	0.61	3.67	2.66	0.41	0.22
90°	9.06	5.77	0.72	4.32	3.15	0.48	0.25
120°	11.4	5.93	0.72	4.15	2.93	0.45	0.23
150°	12.55	5.16	0.68	3.80	2.47	0.35	0.20
180°	12.3	5.37	0.74	3.63	2.42	0.33	0.19

11　参数测试

同步电机参数的测试是十分重要和复杂的工作。在我国同步电机试验方法的国家标准（GB 1029《三相同步电机试验方法》）中对同步电机参数的测试有专门的规定。这里仅就同步电机一般参数的试验方法做简单的介绍。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

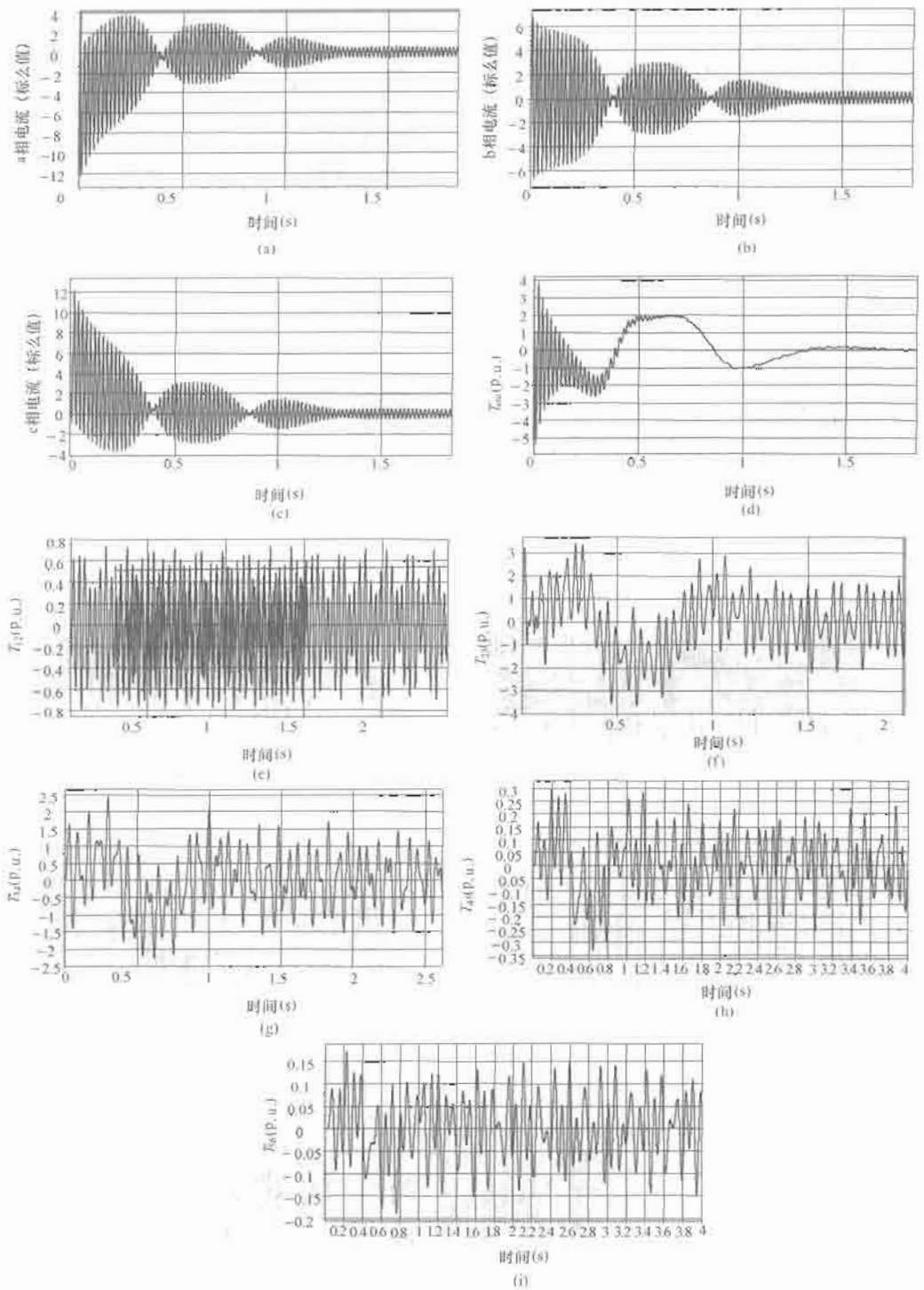


图 2.2-31 600MW汽轮发电机180°误差角并网

(a) a相电流；(b) b相电流；(c) c相电流；(d) 电磁转矩；(e) 励磁机与发电机之间的轴力矩；(f) 发电机与低压缸之间的轴力矩；(g) 两个低压缸之间的轴力矩；(h) 低压缸与中压缸之间的轴力矩；(i) 中压缸与高压缸之间的轴力矩

11.1 方法的选用

同步电机的各种参数有各自不同的测试方法。对不同参数可选择的测试方法列于表2.2-17。具体采用哪种测试方法视实际条件而定。

表 2.2-17 参数测定方法选用

续表

参数	测定方法	备注
X_d	空载—短路特性作图法 低转差法	不饱和值优先选用 不饱和值
K_c	空载—短路特性作图法	—
X_q	反励磁法 低转差法	饱和值或不饱和值 不饱和值
X'_d	三相突然短路法 电压恢复法	饱和值或不饱和值 不饱和值
X''_q	特定转子位置静测法 任意转子位置静测法	不饱和值 不饱和值

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

参数	测　定　方　法	备　注
X_σ	抽转子法	
X''_d	三相突然短路法	饱和值或不饱和值
	电压恢复法 特定转子位置静测法 任意转子位置静测法	不饱和值 不饱和值 不饱和值
X_p	零功率因数过励法	
X_0	开口三角形法 两相对中性点短路法	不饱和值优先选用 不饱和值

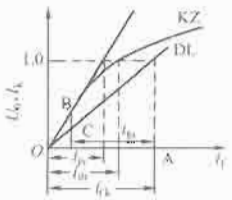
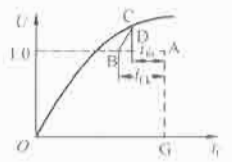
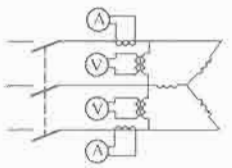
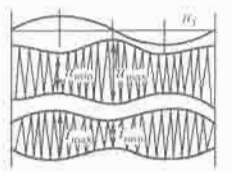
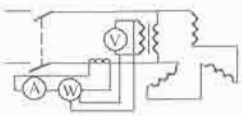
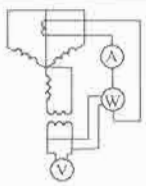
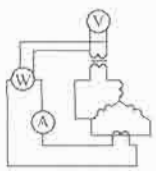
续表

参数	测　定　方　法	备　注
X_2	两相稳态短路法 逆同步旋转法	不饱和值优先选用 不饱和值
T'_d	三相突然短路法，励磁衰减法	
T''_d	三相突然短路法，励磁衰减法	
T'_{d0}	电压恢复法，励磁衰减法	
T_a	三相突然短路法	

11.2　测试方法

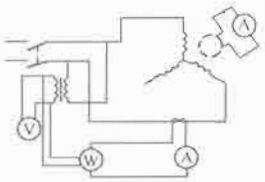
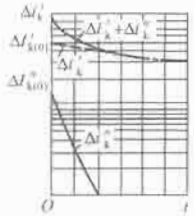
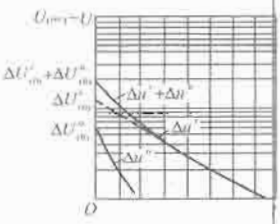
表 2.2-18 给出了各种测定方法的简介。

表 2.2-18　　参数测定方法

方法名称	图　示	公　式	说　明
空载—短路特性作图法		$X_d = \frac{i_{fk}}{i_{f0}}$ $K_c = \frac{i_{f0}}{i_{fk}}$ $X_a = BC$	空载特性曲线(KZ)上对应于额定电压U_N时的励磁电流为i_{f0}，空载特性曲线线性部分延长线上对应于U_N时的励磁电流为$i_{f\delta}$，在三相稳态短路特性(DL)上对应于额定电流I_N时的励磁电流为i_{fk} $AC = i_{f\sigma} = 1.35\frac{N_1 K_{\omega 1} K_k I_N}{pN_f}$ 由C点作横轴垂线交于空载特性曲线B点
零功率因数过励法		$X_p = CD$	A点纵坐标为U_N，横坐标为零功率因数，即过励试验时，对应于U_N、I_N时的励磁电流，AB＝i_{fk}，BC平行与空载特性(OC的直线部分
反励磁法		$X_q = \frac{U}{I}$	作空载电动机运行，逐步减小励磁电流至零，变换极性，再缓慢增加励磁电流，直至失步为止，量取失步前瞬间电枢电压U和最大稳定电枢电流I
低转差法		$X_d = \frac{u_{max}}{i_{fmin}}$ $X_q = \frac{u_{min}}{i_{fmax}}$	励磁绕组短路，电机转子由动力机械拖至接近额定转速，使转差率小于1%，电枢绕组外施(0.02～0.15)U_N的电压，再将励磁绕组开路，用示波器拍摄电枢电压、电枢电流和集电环电压的波形
开口三角形法		$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$ $Z_0 = \frac{U}{\sqrt{3}I}$ $R_0 = \frac{P}{I^2}$	励磁绕组短路，电枢绕组三相串联，电机拖动到额定转速，电枢绕组外施单相电压，使电枢电流为(0.05～0.25)I_N，量取U、I、P亦可在静止时测量，此时应改变转子位置，每次转动的角度相等，测量各个位置的X_0并取其平均值
两相对中性点短路法		$X_0 = \sqrt{3\left(\frac{U_0}{I_0}\right)^2 - 9\left(\frac{P}{I_0^2}\right)^2}$	电机拖动到额定转速，调节励磁电流，使中性点接线的电流达到(0.05～0.25)I_N，量取P、U_0、I_0
两相稳态短路法		$X_2 = \frac{\sqrt{3}P}{I_{k2}^2}$	电枢绕组两相短路，电机拖动到额定转速，调节励磁电流使短路电流为0.15I_N左右，量取P、U、I_{k2}

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

方法名称		图 示	公 式	说 明
静测法	特定转子位置静测法		$X''_d=\sqrt{Z''^2_d-R''^2_d}$ $Z''_d=\frac{\sqrt{3}U_1}{2I_1}R''_d=\frac{3P_1}{2I_1^2}$ $X''_q=\sqrt{Z''^2_q-R''^2_q}$ $Z''_q=\frac{\sqrt{3}U_2}{2I_2}$ $R''_q=\frac{3P_2}{2I_2^2}$	将励磁绕组通过交流表直接短路，在串联的任意两相电枢绕组上外施单相低电压，缓慢转动转子，直到励磁绕组中的感应电流为最大(最小)值为止，调节电枢电流为(0.05～0.25)I_N左右，量取P_1、U_1、I_1(P_2、U_2、I_2)
	任意转子位置静测法		$X''_d=\frac{X_{ab}+X_{bc}+X_{ca}}{3}\pm\Delta X$ $\Delta X=\frac{2}{3}\sqrt{X_{ab}(X_{ab}-X_{bc})+X_{bc}(X_{bc}-X_{ca})+X_{ca}(X_{ca}-X_{ab})}$ ΔX前的符号按下列方法确定：如三个励磁回路电流中的最大值与测得的最大(最小)电抗相对应时取+(−)号 $X''_q=\frac{X_{ab}+X_{bc}+X_{ca}}{3}\pm\Delta X$ ΔX前的符号与上述确定X''_d时相反	将单相低电压，依次加到两相串联的电枢绕组出线端上，量取P、U、I、I_{fd}，在三次试验中，转子位置始终保持不变，其他要求同上
三相突然短路法			$X'_d=\frac{U_{(0)}}{I_{k(\infty)}+\Delta I'_{k(0)}}$ $X''_d=\frac{U_{(0)}}{I_{k(\infty)}+\Delta I'_{k(0)}+\Delta I''_{k(0)}}$ T'_d是$\Delta I'_{k(0)}$自初始值衰减到$0.368\Delta I'_{k(0)}$时所需要的时间；T''_d是$\Delta I''_{k(0)}$自初始值衰减到$0.368\Delta I''_{k(0)}$时所需要的时间；T_a是$\Delta I_{a(0)}$自初始值衰减到$0.368\Delta I_{a(0)}$时所需要的时间	在额定转速下，调节励磁到所需电压，作空载发电机方式运行，在短路前量取电枢电压，励磁电流及励磁绕组温度，然后将三相电枢绕组突然短路，同时用示波器录取一相电枢电压，三相电枢电流以及励磁电流的波形，并录取三相电流及励磁电流的稳定值
电压恢复法			$X'_d=\frac{U_{(\infty)}-\Delta U'_{(0)}}{I_k}$ $X''_d=\frac{U_{(\infty)}-\Delta U'_{(0)}-\Delta U''_{(0)}}{I_k}$ T'_{d0}是$\Delta U'_{(0)}$自初始值衰减到$0.368\Delta U'_{(0)}$时所需的时间	电枢绕组三相短路，被试电机拖到额定转速，将励磁电流调到对应于$0.7U_N$时所需值，量取此时的电枢电流I_k，然后将三相短路开关同时断开，同时录取任一相电枢电流和任一相线电压的恢复波形，并录取稳定电压$U_{(\infty)}$

注 公式中参数均为标么值。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第3章 透平发电机

1 概述

我国发电设备装机容量与发电量已居世界第二位，火电占总装机容量的75%，当前火电300MW、600MW、1000MW为电网主力机组。

透平发电机指隐极发电机，是火力发电厂、核能发电厂的主要设备之一，由汽轮机或燃气轮机驱动发电。

与其他同步电机相比，透平发电机的特点是：

1）因为汽轮机与燃气轮机采用高转速，运行效率高，所以要求汽轮发电机的转速也高。现代汽轮发电机通常采用两极，当电网频率为50Hz时，转子转速为3000r/min；用于压水堆核能发电厂的大型汽轮发电机大都做成4极，转速为1500r/min。

2）转子直径较小、长度较长，通常转子长度 l_r 和定子铁心内径 D_i 之比 $l_r/D_i \approx 2 \sim 6$，以便在容量增大时，转子直径不致过大，使锻件的许用应力易于满足转子离心应力的要求，同时可有效地减小风磨损。

3）材料利用系数高。

4）冷却方式多样。

5）端部漏磁引起的杂散损耗和端部发热，定、转子绕组在槽内和端部的固定，转子强度和振动等问题比其他电机突出。

6）转子通常为隐极式，电机均为卧式安装。

随着电网容量的增大，要求提供大容量的汽轮发电机组，以提高效率，减少材料消耗，降低电站投资和运行费用。由于冷却技术的进步、转子锻件尺寸的增大等，使汽轮发电机的单机容量由100MW迅速提高到1000MW以上。自20世纪70年代中期以来，由于大机组的可靠性、市场等原因，使汽轮发电机的发展重点逐步向提高大机组的可靠性、经济性和对负荷的适应性方面转移，以提高机组总体的技术经济水平。

我国汽轮发电机的规格及主要性能已规范化，有空气冷却、氢冷和水冷三大产品系列，产品系列型谱见表2.3-1和表2.3-2。

表2.3-1 空气冷却系列汽轮发电机

功率 P_N (MW)	视在功率 S_N (MVA)	最大容量 S (MVA)	电压 U_N (kV)	功率因数 $\cos\varphi$	效率 η (%)	冷却方式
12	15.00	$1.05S_N$	6.3，10.5	0.8	97.0	空气表面冷却
15	18.750					
25	31.250				97.4	定子空气表面冷却，转子绕组空气直接内部冷却
30	37.500					
50	62.500				98.2	
60	75.000					
100	117.000		10.5，13.8	0.85	98.4	
135	159.000		13.8			
150	176.470		15.75，18	0.85	98.6	
200	235.000					
300	353.000		18～20	0.85	98.6	

表2.3-2 氢冷、水冷汽轮发电机

功率 P_N (MW)	视在功率 S_N (MVA)	最大容量 S_N (MVA)	电压 U_N (kV)	功率因数 $\cos\varphi$	效率 η (%)
100	117.7	$1.09S_N$	10.5，13.8	0.85	98.4
125	147.0				
200	235.3		15.75，20		98.6
300	353.0				98.7
600	666.7		20～24	0.9	98.8
900	1000.0				98.9
1000	1111.1		24～27		99
1200	1340.0				
1500	1680.0		27～30		

2 透平发电机设计

2.1 设计依据

现代电力网是以大机组、大电厂、高电压、自动化为标志的大系统。透平发电机是该大系统中的一个环节。为提高大电网运行的可靠性，网机之间要有协调。发电机设计、制造和运行的依据来自如何满足现代电力系统对透平发电机的要求。

现代电力系统对透平发电机有在额定工况下长期、稳发、满发的要求。额定工况指的是额定运行点，即额定转速、额定出力、额定电压、额定频率、额定功率因数、额定氢压（如氢气冷却）、额定进风温度等。发电机各有效部位温升、振动、效率、出力应在额定点或尽量接近额定点考核。当然发电机不可能总在额定点运行，更多时间内发电机允许在受限制的范围内运行（这就是出力图），在出力图范围内运行也是正常的，图2.3-1所示是典型出力图举例。进相运行、调峰运行、三相不对称持续运行也属于正常运行范畴内的特殊运行方式。

现代电力系统对透平发电机在非正常工况下的运行有一定的要求，这是兼顾电网和主机设备两者协调的结果，归纳起来如下：

1）对电网各种冲击如突然短路、重合闸引起的扭振有一定的承受能力。

2）有短时失磁异步运行能力。

3）有承受失步振荡的能力。

4）对频率异常有一定的允许运行时间。

5）在一定时间内能承受定子或转子的过电流。

6）在寿命期内应能承受一定次数的误并列。

非等效采用IEC 60034-3的国标GB/T 7064《透平型同步电机技术要求》以及JB/T 10499《透平型发电机非正常运行工况设计和应用导则》这两项标准是设计、运行的主要依据。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

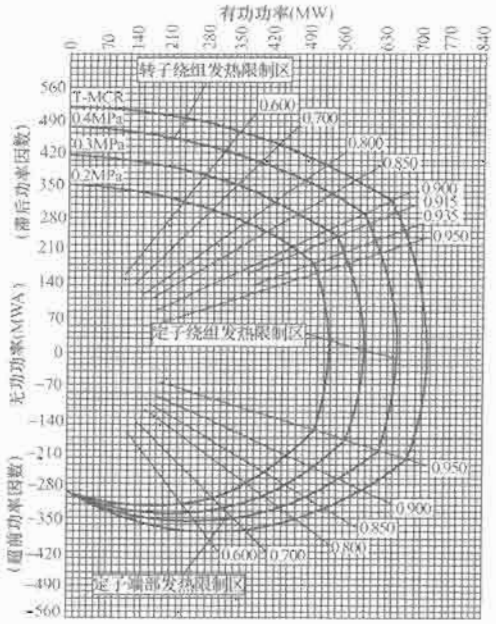


图 2.3-1 典型发电机出力曲线

型号—QFSN-600-2YHG；额定容量—722.2MVA；额定电压—20kV；额定电流—19245A；额定功率因数—0.9；额定频率—50Hz；额定转速—3000r/min；额定氢压—0.4MPa；短路比—0.52；相数—3；额定励磁电压—428.1V；额定励磁电流—4128A

2.2 系列设计、模块设计

汽轮发电机是根据技术任务书或技术合同的要求进行设计的，通常以国家 GB/T7064《透平型同步电机技术要求》作为用户和制造厂签订技术合同的依据。对具体产品如有特殊要求，可另行商定。汽轮发电机是标准化程度较高的产品，国内用户应尽量在系列型谱中选用产品。

在大容量汽轮发电机三个设计阶段中，初步设计主要是电磁设计，包括主要尺寸选定、磁路计算、损耗与效率计算、参数计算和温升计算等项目。这些计算都是以额定运行点为基准的，此外，还应进行各种非额定运行方式的核算。电磁设计完成后应提供有关数据，以进行励磁机、励磁系统和氢油水系统的设计。技术设计主要是确定主要结构，进行通风冷却计算和机械强度计算，并选用合适的材料和工艺方案，施工设计是绘制零部件施工图。

电磁设计完成后发电机本体部分的横断面已经确定，在横断面不变的前提下，改变本体长度就可派生出好几种容量，这就是所谓的模块设计。模块设计为通用性和标准化创造了条件。设计者从整个系列通盘考虑，例如，定子冲片、压圈、端盖、刷架、轴承等均可在同一模块内通用，这样可节约工模具，简化工艺，提高生产效率，降低制造成本，并不断积累经验，提高产品质量。一般在同一冷却方式、同一结构型式下随着转子本体直径不同，设有数个模块（机座号）就可覆盖一大段的容量。

由于计算机辅助设计（CAD）的迅速发展，主要计算都编入程序，形成了各种软件包，在电磁场分析、电动力计算、非正常运行分析、瞬态分析、温度场分布、振动分析和轴系稳定性研究等方面，广泛采用了以计算机为基础的数值计算，使设计工作更细、更快、更准。

大型发电机应采用可靠性设计，即事前确立可靠性目标，明确各部分安全系数，对产品的功能、经济性和寿命进行综合评估。充分利用已有的经验，采用有运行经验的结构，必要时要进行可靠性试验。与本章有关的机械计算参见第1篇第4章，绝缘设计参见第1篇第5章，通风计算参见第1篇第6章。

2.3 与拖动机械匹配

透平发电机的有功功率来自拖动机械，因此透平发电机与拖动机械之间存在着出力匹配问题。透平发电机匹配与拖动机械的蒸汽参数无关，如600MW发电机已经与亚临界、超临界、超超临界、空冷、核电等汽轮机匹配过。

2.3.1 机械匹配要点

理论上发电机可与任何厂家生产的汽轮机相匹配组成最优组合使之运行平稳，轴系振动符合标准，这方面国内外的实例很多。

发电机与原动机械匹配要点如下：

1）发电机联轴器、轴伸、中心高、轴承油量应得到汽轮机厂的会签确认。

2）机组轴系临界转速、扭振计算、轴系挠度计算，发电机与汽轮机制造厂要用相同程序和双方确认的边界条件计算，最后由汽轮机制造厂归口统一向用户提供数据。

3）轴系动平衡和振动在现场调试阶段由调试队负责统一处理。

2.3.2 出力匹配

过去按前苏联规定，发电机额定铭牌出力即最大连续出力，引进美国WH技术后变化如下：

在机、炉、电三大主机中，往往发电机的出力是最大的，这样可避免发电机成为出力瓶颈，另外对发电机设计相对而言也比较容易做到。

例如汽轮机一般有四大工况并且各有定义，即TRL——铭牌工况又称能力工况，THA——热耗考核工况又称额定工况，TMCR——最大连续功率工况，VWO——调节阀全开工况。

电机的额定容量应与汽轮机的THA相匹配，若THA为600MW，功率因数为0.9，则发电机额定容量为667MVA，即发电机在额定电压、额定频率、额定功率因数、额定氢压、额定冷却器进水温度下的容量（若为静态励磁系统时应扣除励磁系统的损耗）。若此时汽轮机的TMCR为654MW，则发电机的最大连续容量应为727MVA，即发电机在额定电压、额定频率、额定功率因数、额定氢压、额定冷却器进水温度下的容量（若为静态励磁系统时应扣除励磁系统的损耗）。虽然汽轮机THA与TMCR这两种工况时冷却水温有很大变化，但发电机最大连续容量时仍为额定进水温度。因为大容量发电机为避免铜铁温差过大，发电机进风温度应保持恒定，即冷却水按33℃设计时进风温度为(40±1)℃，冷却水按38℃设计时发电机进风温度为(46±1)℃。

发电机按额定容量设计，但要留有裕度，使得最大连续容量时各有效部位的温度（通常是转子绕组）不超过标准限值规定。发电机进行型式试验时要在最大连续容量时考核或由额定容量点折算到最大连续容量。发电机的辅助系统如氢、油、水、励磁系统也要在发电机最大连续容量点考核，励磁变压器（静态励磁时）的容量应满足最大连续容量时强励的需要。

汽轮机VWO功率略比TMCR大一点，VWO工况不一定为连续运行工况，因此，发电机靠裕度或调整功率因数是可以满足VWO工况的。

与燃气轮机额定出力对应的环境温度为10℃，燃气轮

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

发电机额定容量对应的进风温度为40℃。制造厂应提供在电厂现场最终冷却介质温度范围内的基本出力曲线。典型的燃气轮发电机的出力图如图2.3-35所示。由图可知，与常规汽轮发电机不同，燃气轮发电机有额定出力、基本出力、峰值出力三种不同的工况。

核发电机的额定容量通常是由核汽轮机选定的。

2.4 冷却方式及其选用

2.4.1 冷却方式

冷却技术在汽轮发电机的发展中占有主导地位。按发电机容量公式

$$P_N = KAB_\delta D_r^2 L_r n$$

式中，K为系数；A为定子线负荷；B_δ为气隙磁通密度；D_r、L_r为转子本体直径、长度；n为转速。

由于B_δ、D_r、L_r增加有限，所以P_N主要靠A而大幅增长，A的提高靠定、转子绕组冷却来实现。

汽轮发电机的冷却方式是指发电机的定子绕组、转子绕组和定子铁心（包括端部结构件）三大主要部件中电磁损耗产生的热量用何种冷却介质和通过什么途径来进行热交换的。

我国汽轮发电机制造业采用的冷却方式较多，技术上较全面，在满足国内外市场需要方面有较大的选择余地。表2.3-3列出了不同容量汽轮发电机通常采用的冷却方式。

由表2.3-3可见，几乎在任何一个容量段均有多种冷却方式并存，200MW空内冷发电机与同种氢冷发电机相比，满负荷时效率低0.5%左右，半负荷时低1%～1.5%，因为空冷机比氢冷机的风摩损耗较大，且在非额定负荷时其值不变。因此，容量为300MVA空内冷发电机体积比氢冷的大，效率也低，显得不一定经济。目前，200MW以上的发电机仍普遍选用水氢氢冷却方式。

表2.3-3 汽轮发电机通常采用的冷却方式

冷却方式			单机容量（MW）							简称
定子绕组	转子绕组	定子铁心	25	50	100	200	300	600	1200	
空外	空外	空								空外冷
空外	空内	空								空内冷
氢外	氢内	氢								氢内冷
氢内	氢内	氢								全氢冷
水内	水内	空								双水内冷（水水空）
水内	氢内	氢								水氢氢

2.4.2 冷却方式的选用

选用何种冷却方式不是目的而是手段，冷却方式先进性要反应在产品综合指标上。

通常，汽轮发电机选用冷却方式的主要依据是：

1）冷却效果好，可靠性高。

2）制造、安装、运行和维护方便。

3）初投资和安装、运行、维护费用的总和为最小。

4）为了便于进行标准化设计和批量生产，提高经济效益，力求同一种冷却方式能在一个较宽的电机的容量范围内合理应用。

5）各制造厂按各自的条件和技术特长，不同容量段应有标准的冷却方式。

近年来，从节约能源角度出发，正在大力发展余热发电、热电联产和蒸汽燃气联合循环发电，因此，20世纪70年代末国外又重新开发了空内冷汽轮发电机新系列，单机容量已达300MW。对200MW及以下的汽轮发电机，这种冷却方式有取代氢冷的可能。

水水空又称双水内冷，仅在我国国内采用，为我国首创。定子蒸发冷却可避免定子水内冷中漏和堵的弱点，对提高可靠性有益，在我国正在发展之中。

水水氢、全水冷在大电机上使用很少，而水氢氢冷却方式在大容量透平发电机上使用最普遍。

2.5 电磁设计

2.5.1 转子本体直径D_r与长度l_r

转子本体直径与长度是汽轮发电机最主要的尺寸。转子中心的切向应力约与转子本体直径的三次方成正比。两极汽轮发电机转子本体的直径为1.25m时，其中心孔的切向应力已接近目前锻件许用应力的极限。转子本体长度受临界转速制约，最长约8m，长径比$l_r/D_r \approx 6.5$。

容量大于1000MW的核能发电厂用汽轮发电机常设计成四极（半速），其转子本体直径可达1.8m，转子本体质量达180t。

当转子本体体积相同时，从降低离心力角度出发，采用较细长的转子较为有利，但应注意随l_r/D_r的增大对临界转速的影响。

2.5.2 气隙长度δ及定子铁心外径D_s

δ值取决于定子电负荷和短路比，关系到发电机的静态稳定能力，并影响发电机成本。

确定定子铁心外径时，应综合考虑轭部能采用的磁通密度、对铁心刚度和振动值的要求以及运输尺寸限界等因素。

2.5.3 定子槽数Q_s

汽轮发电机极数少，每极每相槽数大多采用整数，在一般采用60°相带三相双层绕组情况下，并联支路数为1或2。对于表面冷却的电机一般选用较低的每槽电流值（I_s=2500～6500A），以利于绕组的散热。因此，表面冷却的电机当定子额定电流较大时，绕组最好采用两路并联、槽数较多、槽形高宽比大一些的设计。对于定子绕组导体内冷的电机，则可用较高的每槽电流值（I_s=4000～30000A），选用较少的并联支路数和槽数，以节约绝缘材料和绕组加工量，而每槽电流值则受制于线棒电流所引起的电磁振动。定子一般用开口槽，槽宽$b_{ss} \approx (0.4 \sim 0.5)t_s$，槽深$h_{ss} \approx (6 \sim 9)b_{ss}$（表面冷却），$h_{ss} \approx (3 \sim 5)b_{ss}$（内冷）。

定子槽数确定后，要根据定子绝缘规范来确定槽形。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.5.4 转子槽数 Q_r

转子上实际放置励磁绕组的槽数 Q_r 与槽分度数 Q'_r 之比 γ 的大小影响电机气隙磁场波形与损耗。γ 值为 0.7 时能获得接近正弦波的气隙磁场分布，定子表面的附加损耗较小。转子槽宽 $b_{sr}\approx(0.4\sim0.5)t_r$，槽深 $h_{sr}\approx(3\sim5)b_{sr}$。

中小容量发电机转子采用矩形槽，大容量电机可采用阶梯形或梯形槽。在齿根应力和齿部磁通密度允许的前提下，尽量设法扩大槽面积，多放铜线，以减少转子铜损耗。

转子槽数确定后要根据转子绝缘规范来设计转子槽形。

2.5.5 电磁负荷

汽轮发电机的主要电磁参数有定子电负荷 A，气隙磁通密度 B_δ，定、转子电流密度 J_s、J_r。这些参数与电机的运行性能有着密切的关系，其取值范围如下：

A	空冷	300～1500A/cm
	氢外冷	700～1200A/cm
	氢水冷	1000～2400A/cm
B_δ		0.7～1T
J_s	空冷、氢外冷	3～5A/mm²
	氢水内冷	5～10A/mm²
J_r	空冷、氢外冷	3～5A/mm²
	氢水内冷	7～10A/mm²

2.6 机械设计

2.6.1 柔性机座

发电机的外形尺寸受运输条件限制不能再加大，因此大容量发电机的机座必须设计得很紧凑，在有限元计算帮助下，结构设计既要保证机座刚、强度要求，又要减轻重量，使机座固有振动频率小于激振频率（50～100Hz）10%以上，于是就产生了柔性机座。

2.6.2 统一轴系设计

大容量透平发电机的轴系越来越长，以 600MW 机组为例，发电机长 15.72m，整个机组长约 45m，整个轴系有 9 个轴承，轴系的各阶扭振频率、各阶临界转速、轴系的抑度、轴向热膨胀都有严格要求才能保证正常运行时各个轴振相对振幅小于 76μm。轴系设计由汽轮机厂归口，统一考虑，不断协调才能求得最佳效果，因此，转子动力学的设计难度很高。

2.6.3 固有振动频率计算和测量

大型透平发电机的定、转子动力学中重要部件（如定子机座、铁心、定子端部绕组、转子扭振、转子横向振动等）与激振频率相关的振型和固有振动频率的计算是十分重要的，若接近共振频率、振幅就会超标。

定子铁心和定子机座椭圆固有频率应避开倍频的±10%，对于 50Hz 的发电机合格频率下限小于或等于 90Hz，上限大于或等于 110Hz。对采用端盖轴承机座的固有频率，还应避开转频。定子线棒、引线固有频率和端部整体的椭圆固有频率应小于或等于 95Hz或大于或等于 115Hz。由于定子机座、铁心、定子端部绕组固有频率的计算精确度较差，设计时预知性不强，因此制造厂型式试验时的实测工作尤为重要。转子横向振动固有频率（临界转速）和转子扭振频率也应避开激振频率±10%左右。虽然以上两项计算的精确度较高，有条件时也应在出厂前或在电站取得实测数据。

透平发电机定子绕组是机电能量转换中的核心部件之一，具有电压高、电流大、磁场强的特点。据国内外有关统计，发电机历年事故中约有 20%左右的故障与发电机定子绕组有关，如突然短路，绝缘磨损，铜线断股，水接头漏水等。在机械设计中如何控制定子绕组的振幅是解决问题的关键。有关标准规定，制造厂型式试验时发电机空载和额定短路工况下绕组端部的倍频振动位移峰峰值应小于 100μm，运行中绕组端部各点的倍频振动位移峰峰值要小于 250μm。

$$A=\frac{F}{C}\frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2+\gamma^2}}$$

式中，A 为振幅峰峰值；F 为电动力幅值；C 为系统等效刚度；ω 为激振力频率；ω_0 为系统固有频率；γ 为阻尼系数。

F 取决于定子线棒电流，C 与 γ 是模块设计变动的余地不大，故振幅 A 主要靠调整 ω_0 来控制，而且需要留有裕度。

美国、日本的制造商生产 60Hz 发电机占多，在引进他们的技术时，要特别注意从 60Hz 改变成 50Hz 设计时的固有振动频率问题，因为在 60Hz 下合格的固有频率在 50Hz 时就有可能不合格，往往需要重新设计。

2.6.4 应力集中

转子槽楔肩胛、齿头、转子本体鸽尾槽、引线槽等转动部件不能有尖角，必须加工出 $R\geqslant2$mm 以上的圆角，圆角的应力集中系数小，往往会使应力减少 1 倍以上，从而可避免尖端裂纹的产生。特别对频繁起停的发电机转子更要注意低频疲劳问题。

2.7 热计算与温升限值

2.7.1 热计算

热计算的主要任务是，根据电磁设计中的损耗发热量和通风计算中所确定的冷却介质流动情况，计算出发电机定子铁心和定、转子线圈的温升。由于影响热计算的因素较多，热计算如同通风计算一样，只要求达到工程上认可的精确度，对于同一结构，通过对计算值和试验值进行对比分析，就可以在设计阶段估算出铁心和绕组的温升，从而做出合理的设计。

热计算要点参见第 1 篇第 6 章。

2.7.2 温升限值与取值

各类冷却方式、透平发电机温升限值由 IEC 60034-1 相关标准规定。

表 2.3-4 为空冷电机温升限值，表 2.3-5 为氢气间接冷却的温升限值，表 2.3-6 为氢气和水直接冷却的温度限值，

表 2.3-4 空冷电机温升限值

部 件	测量位置和测量方法	冷却介质为 40℃时的温升限值（K）
定子绕组	槽内上下层线圈间埋置检温计法	85
转子绕组	电阻法	间接冷却：90 直接冷却：75（副槽），65（轴向）
定子铁心	埋置检温计法	80
集电环	温度计法	80
不与绕组接触的铁心及其他部件	这些部件的温升在任何情况下都不应达到使绕组或邻近的任何部位的绝缘或其他材料有损坏危险的数值	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 2.3-5 氢气间接冷却的温升限值

部 件	测量位置和测量方法	冷却介质为40℃时的温升限值（K）
定子绕组	槽内上、下层线圈埋置检温计法	氢气绝对压力 0.15MPa及以下 85 >0.15MPa≤0.2MPa 80 >0.2MPa≤0.3MPa 78 >0.3MPa≤0.4MPa 73 >0.4MPa≤0.5MPa 70
转子绕组	电阻法	85
定子铁心	埋置检温计法	80
不与绕组接触的铁心及其他部件	这些部件的温升在任何情况下不应达到使绕组或邻近的任何部位的绝缘或其他材料有损坏危险的数值	
集电环	温度计法	80

表 2.3-6 氢气和水直接冷却的温度限值

部件	测量位置和测量方法	冷却方法和冷却介质	温度限值（℃）
定子绕组	直接冷却有效部分的出口处的冷却介质检温计法	水	90
		氢气	110
	槽内上、下层线圈间埋置检温计	水，氢气	90①
转子绕组	电阻法	氢气直接冷却、转子全长上径向出风区数目② 1和2 3和4 5～7 8～14 14以上	 100 105 110 115 120
定子铁心	埋置检温计法	—	120
不与绕组接触的铁心及其他部分	这些部件的温度在任何情况下不应达到使绕组或邻近的任何部位和绝缘或其他材料有损坏危险的数值		
集电环	温度计法	—	120③

① 用埋置检温计法测得的温度并不表示定子绕组最热点的温度，如冷却水和氢气的最高温度分别不超过有效部分出口处的限值（90℃和110℃），则能保证绕组最热点温度不会过热，埋置检温计法测得的温度还可用来监视定子绕组冷却系统的运行。

在定子绝缘引水管出口端未装设水温检温计时，则仅靠定子线圈上下层间埋置的检温计来监视定子绕组冷却水的运行。此时，埋置检温计的温度限值应不超过90℃。

② 采用氢气直接冷却的转子绕组的温度限值是以转子全长上径向出风区的数目分级的。端部绕组出风在每端算一个风区，两个反方向的轴向冷却气体的共同出风口应作为两个出风区计算。

③ 集电环的绝缘等级应与此温度限值相适应，温度只限于用膨胀式温度计测得。

均为F级绝缘按B级考核。F级绝缘按B级考核是为了留有裕度确保绝缘材料平均有40年的寿命。标准中规定的温升或温度限值仅适用于额定运行点，当运行点偏离额定点，则电机的温升或温度有可能逐步超过其限值，如图2.3-2所示。图中发电机运行时的综合变化分为A和B两区。发电机应能在区域A内连续运行，并实现其规定的功能，但其性能不必与额定点完全相符；在A区的边界上运行，温升或温度可能要超过标准规定的限值约10K。在实际使用中，有时要求电机在B区运行，但应在数值、持续时间及发生频度等方面加以限制，除非采取校正措施，例如降低出力，否则会缩短电机的寿命。

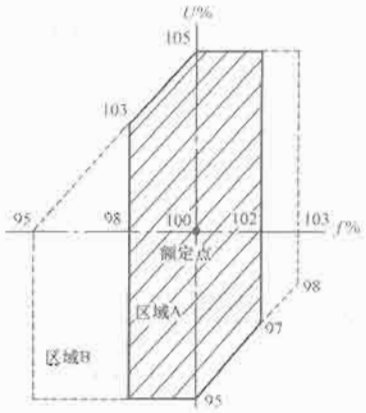


图 2.3-2 电机频率运行范围

考虑到发电机有最大连续出力的要求、计算与测量的误差以及电机要在A区运行，一般电机的额定温升或温度取限值的75%较为合适，温升或温度太低，表明电机裕度过大，造成成本增加。

3 发电机的结构

3.1 基本结构

发电机由定子（机座、铁心、定子线圈和出线装配等）、转子（本体、转子线圈、护环、中心环、风扇和集电环或整流环等）以及端盖、轴承、刷架和底板等部件组成（见图2.3-3）。

其关键工艺不在此论述。

3.1.1 定子

定子结构如机座、定子铁心和定子绕组参见第1篇第4章。对大型汽发电机还应充分考虑定子机座的隔振措施和定子铁心、定子绕组的紧固结构。

（1）隔振结构

定子机座振动主要是由旋转磁场作用于铁心的磁拉力引起的，其振动频率为两倍工作频率（100Hz）。当两极发电机铁心振动的双倍振幅计算值达到或超过30μm时，机座与铁心之间就应考虑采用弹性联接结构来隔振，以防止因铁心振动而损害机座焊缝和基础。机座的固有振动频率应离开共振频率的±10%或以上。

目前，弹性联接隔振结构型式较多，效果各不相同。选择铁心隔振结构应满足定子运输尺寸和质量、定子通风系统等方面的要求，并尽可能使结构简单，以降低成本。表2.3-7列出了定子常用各种隔振结构的型式及特点。各种隔振结构在运输前都应加临时固定，以免运输中损坏隔振元件。

（2）定子铁心轴向固定结构

通常有机壁固定、压圈固定和穿心螺杆固定三种，见表2.3-8。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

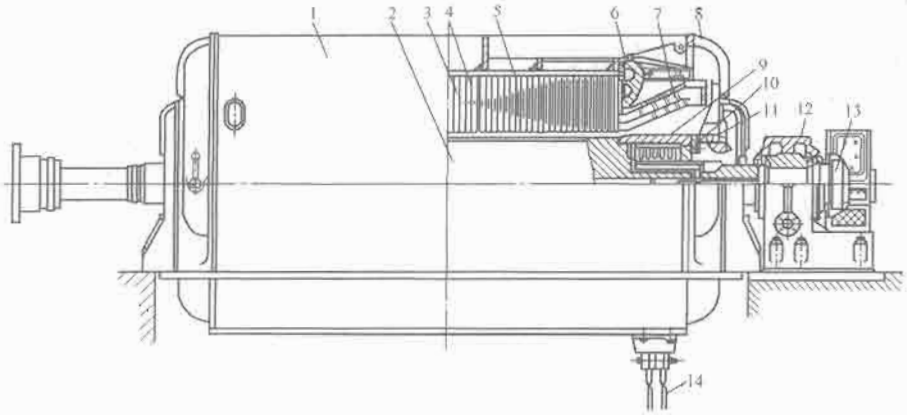


图 2.3-3 汽轮发电机的基本结构

1—定子；2—转子；3—定子铁心；4—定子铁心的径向通风沟；5—定位筋；6—定子压圈；7—定子绕组；8—端盖；9—转子护环；10—中心环；11—离心式风扇；12—轴承；13—集电环；14—定子电流引出线

表 2.3-7 各种隔振结构

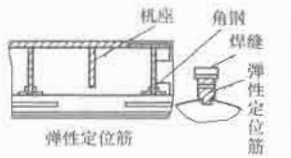
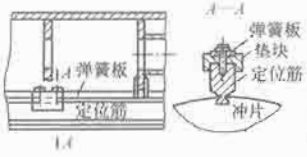
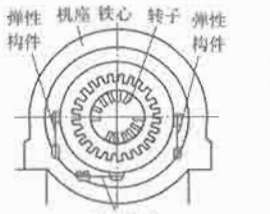
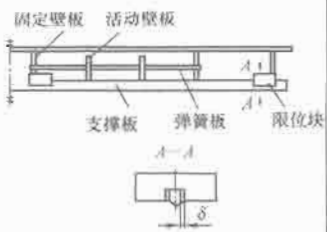
结构型式示意图	隔振元件材料	隔振系数	特点
	20CrNiMo $\sigma_s \geqslant 420$MPa $\sigma_b \geqslant 550$MPa $\delta \geqslant 16\%$	4～6	机座内圆不加工，工艺简单、实用，定子尺寸小、质量轻
 组合弹性定位筋	34CrNi3Mo $\sigma_s \geqslant 735$MPa $\delta \geqslant 13\%$ $\psi \geqslant 35\%$	>5	机座内圆要加工，定位筋与弹簧板同钻铰，工作量较大
 稳定构件 定子弹性支撑（立式弹簧板）	高强度钢板 $\sigma_s \geqslant 686$MPa $\sigma_b \geqslant 755$MPa $\delta \geqslant 18\%$ $\psi \geqslant 40\%$	>5	内外机座有整体运输和分开运输两种。隔振效果好，安全因数大，成本较高
	Q235 $\sigma_s \geqslant 240$MPa	>4	隔振元件材料要求不高，机座内圆不加工，工艺简单，质量较轻

表 2.3-8 定子铁心轴向固定结构

固定方式	材料	特点
机壁固定 （见图 2.3-4）	机壁带压圈 Q235 $\sigma_s \geqslant 215$MPa	结构简单，成本低，用于15MW以下机组
压圈固定 （见图 2.3-5）	非磁性铸钢压圈 ZG25Mn18Cr4 $\mu \leqslant 1.1$ $\psi \geqslant 20\%$ $\sigma_s \geqslant 157$MPa $\psi \geqslant 15\%$	有时表面配以铜屏蔽。适用范围较大
穿心螺杆固定 （见图 2.3-6）	CrMnN 不锈钢 $\sigma_{0.2} \geqslant 617$MPa $\sigma_b \geqslant 823$MPa $\mu \leqslant 1.02$ $\delta \geqslant 30\%$ $\psi \geqslant 50\%$	压板分块、较薄，端部配以磁屏蔽，齿部更易压紧。适用范围广，成本高

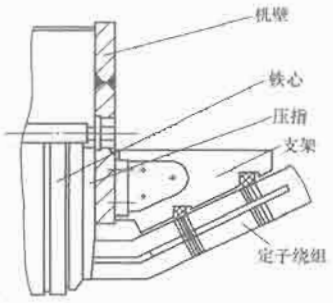


图 2.3-4 铁心机壁固定

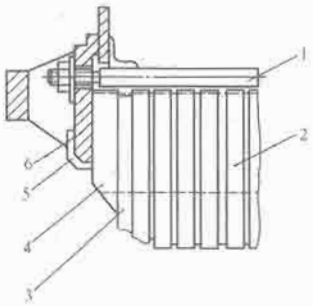


图 2.3-5 铁心压圈固定

1—定位筋；2—铁心；3—压指；4—磁分路环；5—电屏蔽环；6—压圈

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

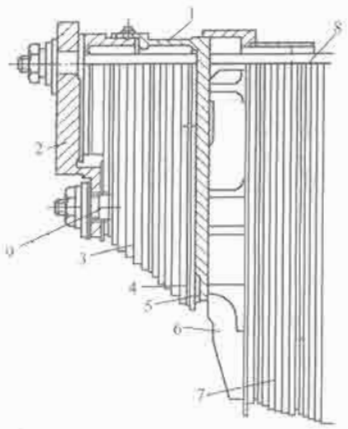


图 2.3-6 穿心螺杆固定
1—端板；2—分块压板；3—磁屏蔽；4—通风槽钢；5—夹入楔形垫片；6—压指；7—铁心；8—定位筋；9—穿心螺杆

(3) 定子绕组固定

随着电磁负荷的增大，使定子绕组承受的电动力增大。加之定子铁心振动使定子绕组在运行时也产生振动，若不加以限制，就会在运行中造成主绝缘磨损、导线断裂和电弧腐蚀等事故。

突然短路时作用在定子绕组上的力，可超过额定状态时的100倍以上，如果固定不好，容易产生槽楔断裂、线棒跳入气隙、绝缘出现裂纹和端部线圈与连接线变形等事故。

定子绕组支撑系统的固有振动频率应避开50Hz和100Hz，而且需注意材料的老化与松弛。应通过结构和工艺措施提高绕组端部的整体性，使其沿径向和切向牢固固定，但在轴向有伸缩余地。

1) 槽内固定。典型的定子线棒槽内固定结构如图2.3-7所示。波纹板设在槽楔下面以产生预紧力，采用涨管热压工艺保证槽部固紧。

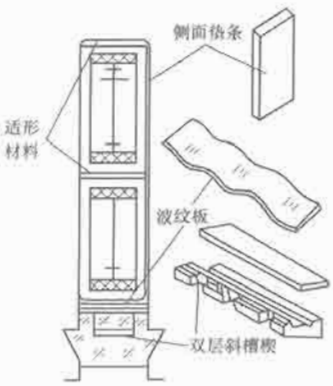


图 2.3-7 定子线棒槽内固定

2) 端部固定。300MW汽轮发电机定子绕组端部有压板和绑扎两种固定结构，分别如图2.3-8和图2.3-9所示。600MW汽轮发电机为增强整体性，采用了锥环结构，如图2.3-10所示。绕组端部的固定品质可通过测振型和测振幅考核，见相关标准。

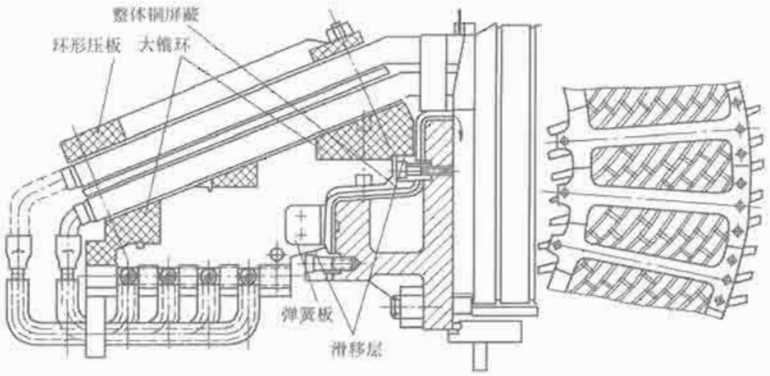


图 2.3-8 300MW汽轮发电机定子绕组端部压板结构
(右图为端部压板固定后形成的内撑环)

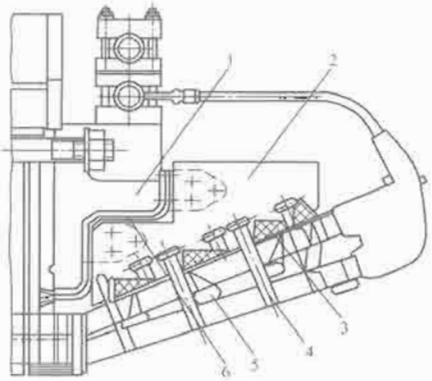


图 2.3-9 300MW汽轮发电机定子绕组端部绑扎结构
1—整体非磁性压圈；2—绝缘支架；3—内绑环；4—绑绳；5—层间绑环；6—整体铜屏蔽

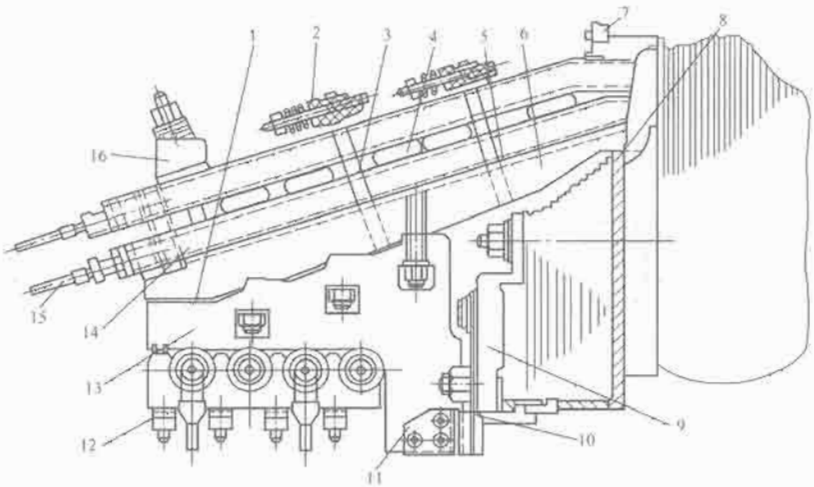


图 2.3-10 600MW汽轮发电机定子绕组端部锥环结构
1、5—适形材料；2—调整绑环；3—调整绑环的绑带；4—支撑软管；6—锥环；7—气隙隔环；8—绝缘环；9—铁心压板；10—弹簧板；11—支架夹板；12—引线固定；13—绝缘支架；14—下层线圈；15—引水软管；16—内撑环

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3.1.2 转子

（1）转轴

汽轮发电机的转轴是整体锻成的。转轴的本体部分作为磁极，在专用铣床上加工出若干槽，放置励磁绕组。无槽的大齿为磁极极身。转轴运行时要承受很大的离心力、弯曲应力和扭转应力，在齿根和中心孔处应力最大，因此，都用高强度合金钢锻造。转子锻件的力学性能见表 2.3-9，磁化性能见表 2.3-10。

表 2.3-9 转子锻件力学性能参考范围

名称	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服点 σ_s (MPa)	伸长率 δ (%)	断面收缩率 ψ (%)	冲击韧度 α_k (J/cm²)
小容量发电机	490～590	290～440	17	40	69
中容量发电机	640～690	490～540	17	40	78
大容量发电机	730～780	640～690	15～17	35～40	59～78

表 2.3-10 转子锻件的磁化性能

磁化强度 (A/cm)	磁通密度 B (T)
50	≥1.6
150	≥1.8
500	≥2.0

转子锻件常用的钢种有 34CrNi3Mo、34CrMo1A、25CrNi3MoV 和 26Cr2Ni4MoV 等几种。

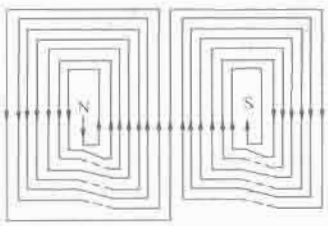


图 2.3-11 转子绕组接线图及线圈中电流示意

（2）转子绕组

转子绕组采用同心式分布绕组，由若干个线圈组成，其接线如图 2.3-11 所示。

（3）护环和中心环

护环套在转子绕组端部外面，使在离心力作用下线圈端部不致沿径向甩出。中心环（连同绝缘垫块）用于阻止转子绕组端部沿轴向移动及护环椭圆变形。

护环的常用结构有两端刚性固定的护环和悬挂式护环两种，如图 2.3-12 和图 2.3-13 所示。

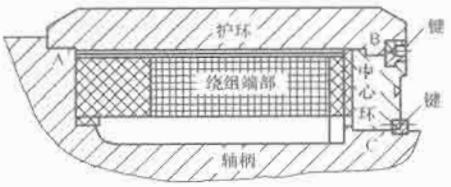


图 2.3-12 刚性固定的护环—中心环结构

两端刚性固定结构，中心环热套在转轴上，护环固定在中心环与转轴本体上。它结构简单，通常用于转子本体直径 D_r 不大于 0.85m 的发电机中，对于转子直径 D_r 在 0.85m（轴柄刚度大的可以大些）以上的发电机，由于轴柄段的相对挠度较大，转子运行时在 A、B、C 三个配合面上产生的较大交变应力，会导致配合面的损伤，应采用悬挂式结构。

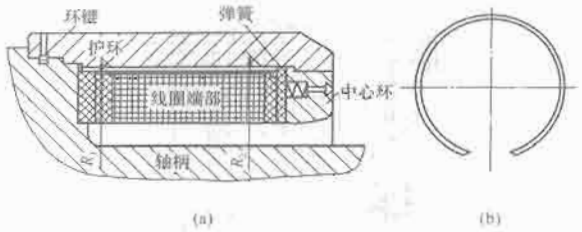


图 2.3-13 悬挂式护环—中心环结构（环键固定）

护环一般都采用无磁性合金钢锻件，力学性能要求比转子本体的还高，当磁化强度为 160A/cm 时，护环的相对磁导率 $\mu_r \leqslant 1.1$。为防止大容量发电机的护环产生应力腐蚀，普遍采用对应力腐蚀不敏感的 18Mn18Cr 钢种。应力腐蚀与机内湿度关系较大，应保持机内干燥。

（4）转子槽楔

转子槽楔用以固定转子线圈，承受线圈的离心力，也可以成为阻尼系统的一部分，当电机不对称运行时，倍频电流将在其中产生损耗并使其发热。为使槽楔受力均匀，且使阻尼回路畅通，槽楔的鸽尾斜面和转子齿的斜面必须紧密接触。

转子槽楔一般用硬铝制成，靠近转子端头的槽楔由于需要有较好的抗蠕变性能和较小的接触电阻，一般采用冷拉的铝铁镍青铜或锻制的铝青铜、铍青铜等。

（5）风扇

转子风扇有后倾叶片离心式和旋桨式两种（参见第 1 篇第 6 章）。轴向通风的发电机也使用高压多级风扇。

离心式风扇通常用于 100MW 及以下的发电机，产生的压头较高，流量较小，效率约为 30%，用钢板焊接或用硬铝板铆接制成。

旋桨式风扇通常用于 100MW 以上的发电机，它产生的压头低，流量大，效率为 40%～60%，风叶多数为铝合金模段而成，表面需经抛光处理，安装角应严格控制，一般不超过 30°，否则风量增加不多而风扇特性变坏。

（6）集电装置

随着发电机容量增加，励磁电流大幅增长，百万千瓦级发电机的额定励磁电流达 6000A 左右。为避免炭刷运行中大量的维护工作，曾经在大容量发电机上开发了无刷励磁系统。但是静态励磁因其结构简单、强励上升速度快、逆变灭磁方便等优点，越来越受到青睐，于是发展大容量集电装置就十分重要。如何解决集电环过热和不使炭粉堆积是关键所在，图 2.3-14 所示为大电流集电环装置。集电环单独装在一根轴上并与转轴把合，也可直接装在轴上。集电环装置由隔音罩形成进出风路并在两集电环中间加装离心式风扇循环通风冷却。集电环表面车有螺旋散热沟，轴向和径向设有通风孔，采用 ϕ380mm 外径以减小机械摩擦损耗，采用组合式刷握在运行中可更换炭刷，采用合理通风使炭粉难堆积，采用性能良好的炭刷，提高抗磨性。对牌号 NCC634 来说，良好的运行条件是，电流密度 5.5～8A/cm²，表面线速度 45～80m/s，绝对湿度 8～13g/m³，集电环温度 80～90℃，炭刷压力 16～20MPa。由于集电环小轴很长，要在轴端设有抑振轴承。投运前要按厂家规定，对炭刷进行研磨以保持良好接触。

3.1.3 轴承

汽轮发电机用液体摩擦滑动轴承，轴颈的圆周速度为 20～85m/s。当润滑油为层流时，轴承的摩擦损耗与轴颈线速度的二次方成正比。当雷诺数超过某一范围使油流转变为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

紊流时，摩擦损耗约与线速度的三次方成正比。大容量发电机轴瓦的损耗为80～120W/cm²，而油楔的局部损耗可达每平方厘米几百瓦。

在设计大容量发电机轴承时，应注意减少轴承损耗，加强冷却，降低温升，提高寿命；另一方面，由于大容量发电机的二次临界转速低于额定转速，在选择轴承结构型式和参数时，要注意转子在轴承中运转的稳定性，避免出现油膜振荡等现象。表2.3-11列出常用的几种轴瓦的结构型式及其特点。

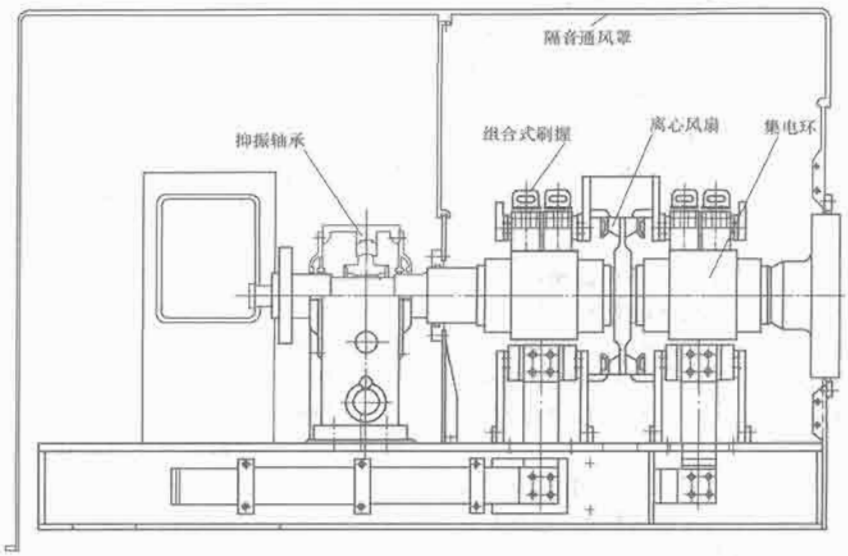
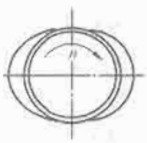
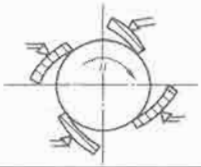


图2.3-14 大电流集电环装置

表2.3-11 几种轴瓦的结构型式及其特点

	圆筒瓦	椭圆瓦	活动支撑分块瓦
名称及示意图			
承载能力（MPa）	0.8～1.5	1.0～2.0	0.8～2.0
稳定性	较 差	中 等	好
应 用	150MW以下机组	大容量机组	大容量机组
特 点	结构简单，加工方便	结构简单，加工方便，冷却效果好。水平方向油膜刚度较垂直方向的低	摩擦损耗较前三种轴承的大，能自动适应转轴位置，能取较小的制造间隙。在其他条件相同时由层流转变为紊流的转速较高，冷却效果好

3.1.4 通风系统

（1）总体风路

小容量汽轮发电机通常采用结构简单的开启式通风系统。大容量汽轮发电机通常采用闭路循环通风系统，这种系统具有防尘、防潮、冷却介质不受环境温度影响和一定的隔离噪声等优点。通常它又分为压入式径向闭路循环通风系统和抽出式闭路循环通风系统。

1）压入式径向闭路循环通风系统。如图2.3-15（a）所示，在风扇作用下，冷却介质被压入，以冷却定子绕组、铁心和转子。定子铁心沿轴向交替分成几个冷热风区。一部分冷却气体自背部径向流过铁心到气隙，然后由相邻的热风区径向流出；另一部分直接由气隙进入热风区，热风由冷却器冷却后又进入风扇循环。压入式系统的特点是定子绕组端部和铁心端部能得到较好的冷却。这种通风系统应用较多。

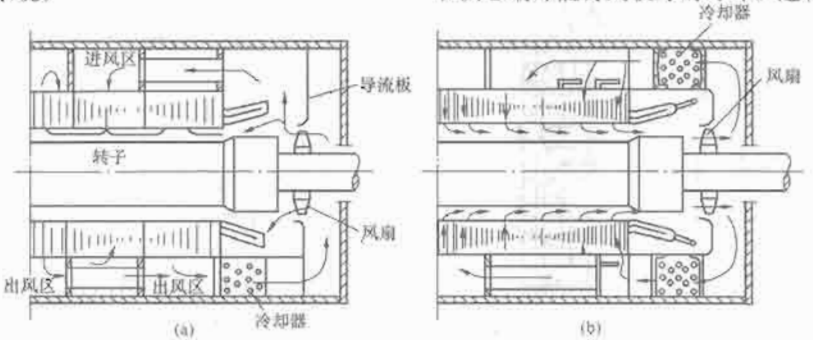


图2.3-15 通风系统

（a）两进三出压入式的径向通风；（b）抽出式单路径向通风

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2）抽出式闭路循环通风系统。如图 2.3-15（b）所示，热风被风扇从有效部分抽出，经冷却器冷却后再进入定子铁心背部。抽出式系统的特点是进入有效部分的冷却介质温度不受风扇损耗的影响，密封瓦处于正压区，对防止密封油漏入机内有利，特别是抽出式单路径向通风系统结构更为简单。

与轴向通风系统相比，在径向通风系统中，定子能得到较均匀的冷却，系统的风阻及通风损耗小，风扇结构较简单。空冷电机中通风损耗所占比例较大，因此，在保证温升限值前提下，应减少总风量，以提高发电机效率。

在闭路循环通风系统中，要用气体-水冷却器对吸热后的冷却介质进行冷却，以便循环使用。气体-水冷却的结构参见第 1 篇第 6 章。

（2）转子内冷通风系统

25MW 及以下的空冷汽轮发电机，铜线电流密度不高，可采用表面冷却。损耗热流由转子绕组穿过槽绝缘传到转子表面，然后连同转子表面损耗由冷却介质带走。为增强冷却效果，有的在齿部开轴向通风槽。护环下转子绕组端部通风有两种方式：一种是护环上开孔；另一种不开孔，冷却介质经由大齿中铣出的风道排出。

容量超过 25MW 的空冷汽轮发电机或容量超过 100MW 的氢冷汽轮发电机一般可采用转子内冷通风系统。它主要有气隙取气和带副槽的径向通风系统两种。在设计转子内冷通风系统时，应尽量减小温度不均匀系数。

1）气隙取气通风系统。图 2.3-16 所示为气隙取气通风系统。定、转子风区是相互匹配的，由转子表面的进风斗对气隙气流的相对运动所形成的正压和气体从出风斗甩出时所形成的负压构成转子导体内部冷却风沟里气体流动的压力源，风沟中的风速约为转子圆周速度的 15%～20%，进入转子导体的气体总流量随转子本体的长度成正比地增加。转子本体长度增加时，沿本体长度上的风区数也相应增加，从而在每条风路长度不增加时，增加了并联风路数，因此，冷却比较均匀。

图 2.3-17 为它的槽截面，图 2.3-18 是气隙取气斜流、导体内部铣有两排通风孔的进出风示意图。槽楔上一个风斗供两路风沟的进风之用。转子线圈端部的冷却采用单路内部冷却或双路内部冷却。双路内部冷却风路短、风阻小，能改善端部的冷却。如在定、转子进出风区分界处装置气隙隔环，将进出风区隔开，以减少冷热风的混合，则可进一步提高转子的冷却效果。此外，还可以沿轴向在定子上装设几个轴向隔板，以减缓气隙中气体被转子带动而旋转的效应，从而增加气流对转子的相对速度，提高风沟内的风速，气隙取气每风区长度约为 400mm 左右。

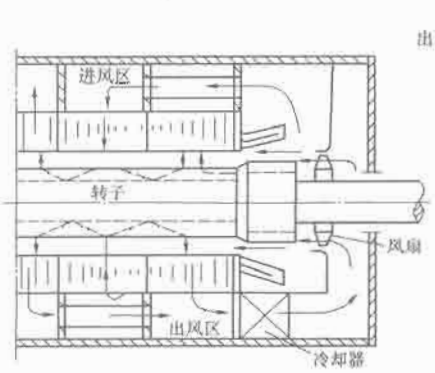


图 2.3-16 气隙取气通风系统

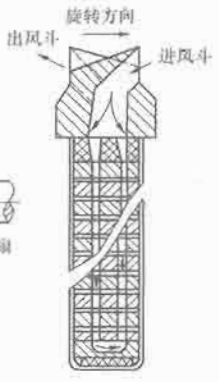


图 2.3-17 气隙取气斜流、导体内部铣孔的转子槽截面



图 2.3-18 气隙取气斜流、导体内部铣孔的转子进出风示意图

2）带副槽的径向通风系统。它也是一种自通风系统，利用进出风孔处的半径差而形成所需压头。冷风从两端由槽底副槽轴向进风，沿途通过导体内部径向风沟排至气隙。根据容量不同，铜线上可开单排孔或双排孔。为了进一步提高表面散热系数，在导体内做成截面交替收缩和膨胀的径向风沟，转子槽截面如图 2.3-19 所示。该通风系统比较适合半速四极电机。对两极机，由于副槽尺寸不可能很大，约有 50%的风压将降在副槽入口处，所以不适用于 600MW 及以上的大容量汽轮发电机。

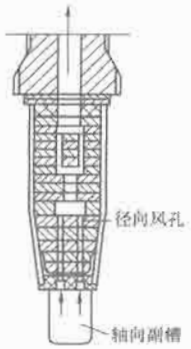


图 2.3-19 带副槽交替收缩和膨胀的径向转子槽截面

3）轴向内冷通风系统定、转子轴向内冷系统需要较高风压，需在转子上安装高压多级风扇，不仅增加了风扇损耗，也使结构变得复杂。

3.2 空冷发电机

空冷汽轮发电机具有结构简单，安装、运行、维护方便，辅助系统少和可靠性高等优点。国外空内冷汽轮发电机单机容量已发展到 400MW。

大容量空冷汽轮发电机应着重解决下列一些关键问题：

1）通过减薄定子线棒主绝缘厚度，将包有少胶带的线棒全部嵌完线后连整个定子铁心实施真空浸渍（Global Vacuum Pressure Impregnation，GVPI）等措施，使定子槽内嵌线间隙被环氧胶填满，提高其热导率，以降低定子绕组与铁心间的温差。绝缘系统需要很大的卧式浸胶罐，干燥、抽真空、压力浸渍都在同一罐内完成，生产效率较高。GVPI 系统设备的初投资较大，但能节省工时，简化制造过程，从而降低成本。GVPI 系统需要定子铁心外压装并采用双机座结构，使定子铁心与机座可平行作业，缩短了整个生产周期。另外，内机座尺寸小，适合整浸的需要。

2）要防止转子绕组热膨胀引起的有害变形，解决的途径是：

①采用冷拉含银铜线（含银量约 0.1%），以提高铜线蠕变强度。

②设计时铜线机械应力和热应力之和不得超过 200MPa。

③线圈端部采用中频焊接，以减小热影响区范围。

④在转子本体中间用绝缘销固定转子线圈，使转子线圈受热后从中心向两端伸长。

⑤槽内匝间绝缘采用环氧玻璃布，它与铜线间的摩擦系数 $\mu=0.15$，而槽衬、楔下垫条、护环下绝缘与铜线接触面使用滑移材料，控制摩擦系数 $\mu\leqslant 0.05$。当转子绕组热胀冷缩时，可使整个绕组成整体滑动。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

⑥线圈端与中心环之间设置弹簧，允许转子绕组轴向伸缩。在槽底设置径向弹簧使盘车时槽楔与本体齿在压力下接触，以免变频器谐波电流引起的烧伤。

⑦对空内冷转子，要在制造厂进行热态动平衡与超速试验，以观察是否有转子线圈热膨胀不均匀而产生的振动或匝间短路。

3）空冷汽轮发电机中通风损耗所占的比例较大，降低通风损耗的解决途径是：

①转子采用带副槽的径向内冷通风系统，以降低转子表面风摩损耗。

②提高进出风温差，以减少总风量，风温差可取40～50K。

③注意使各支路风量合理分配，减小轴向温差。

④采用效率较高的桨式风扇。风叶、导风环和风扇座环都应该精心设计，并降低表面粗糙度。

⑤整个风路与外界和各风室之间必须良好密封，严防漏风和窜风。

4）大容量空冷汽轮发电机因采用转子直接空冷，要防止灰尘进入而阻塞通风道。呼吸器必须精心设计，既要起到过滤效果，又要尽量减少风阻。为保证发电机内空气湿度合格，停机时应接通加热器进行加温。

5）当额定电压高于6kV时，必须精心设计和精心制造定子线棒的防电晕结构，使槽内、定子出槽口和线棒端部渐伸线拐弯处的电位梯度均匀，以提高起晕电压。

3.3 氢冷发电机

图2.3-20为氢冷汽轮发电机示意图（定子绕组为水内冷）。

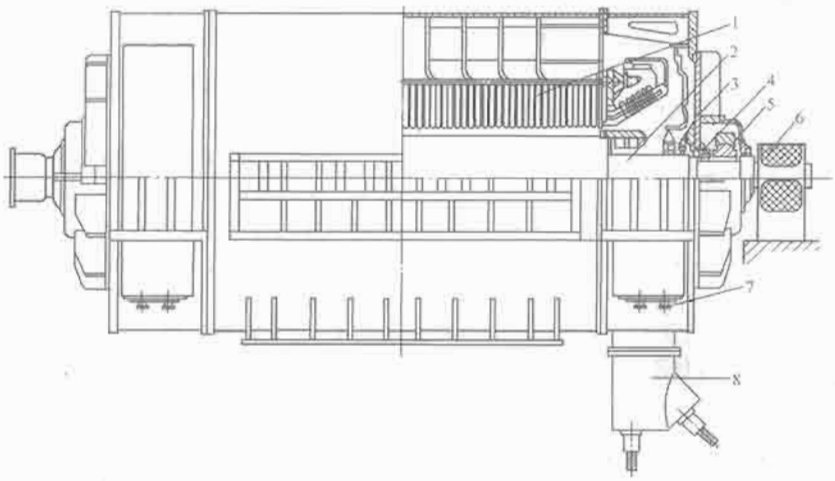


图2.3-20 氢冷汽轮发电机（定子绕组为水内冷）

1—定子；2—转子；3—轴承端盖；4—油密封；5—轴承瓦；6—电刷罩；7—冷却器；8—出线盒

氢冷汽轮发电机具有以下特点：

1）当电机内氢的纯度为97%时，因其密度只有空气的1/10，所以电机的通风损耗及转子表面的摩擦损耗都大大减小。

2）氢的热导率约为空气的7倍，它可改善槽内间隙的导热能力，纯度为97%的氢的表面散热系数比空气的约大35%，且表面散热能力按氢压的0.8次方增加。

3）氢电离时不产生对绝缘有害的气体，并且在较高氢压下运行的电机内部不易产生电离，对防电晕有利。

4）为防止氢泄漏，电机的动、静接合面必须采取有效的密封措施，增加了一套油系统，使结构复杂。

5）为使电机内氢维持在规定的纯度和压力值，需增设一套供氢装置，安装时必须找漏并消除泄漏点，增加了投资和运行、维护工作量。

6）为确保机内出现氢爆时的安全，机座和端盖应能承受0.8MPa的水压试验，所以氢冷电机比空冷电机所用钢板较厚，用钢量增加。

3.3.1 机座和端盖

氢冷电机的机座和端盖采用焊接结构。机座外壳、端板和内壁板均比空冷电机的厚。机座上有冷却器，按安装位置可分立式、卧式和背包式三种。机座可设计成整体的或分段的，这取决于运输的限界尺寸及加工条件。端盖分上下两瓣，用螺钉把合。通常将轴承安放在端盖内，要求端盖有足够的径向、轴向刚度，否则将在氢压作用下产生变形，导致轴的振动和影响油密封正常工作。

3.3.2 油密封

油密封装在转轴伸出端盖处，以高于机内氢压的压力油注入密封瓦与转轴之间的间隙，阻止氢气漏出。国内最常用的双流环式油密封结构如图2.3-21所示，氢侧与空气侧各有一油流。氢侧油自成一密封循环系统在接触氢气后含氢量达到饱和，空气侧的油压由平衡阀控制，与氢侧油压接近相等，使密封油隙处的油交换量降至最小。油气压差阀自动保持油压始终高于氢压，以达到密封的目的。

双流环式油密封的优点是氢消耗量小，缺点是来油未经

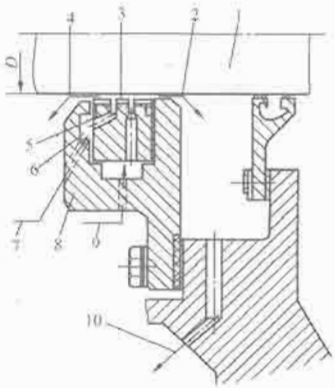


图2.3-21 双流环式油密封结构

1—轴；2—氢侧出油；3—密封油楔；4—空气侧出油；5—密封瓦；6—空气侧供油室；7—空气侧的进油；8—密封座；9—氢侧进油；10—氢侧出油（油管未画出）

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

处理油中水分易带入机内，为保证机内氢气湿度机内要装氢气干燥器。

另一种为单流环式密封瓦，密封油进入密封瓦之前要经过真空净油装置除去油中的水以保持机内氢气湿度，同时油经过真空净油装置会使耗氢量增加，这是单流环式的缺点。

3.3.3 氢、油控制系统

油密封供油系统和气体控制系统是氢冷汽轮发电机的重要辅助设备。供油系统向密封瓦正常供油，以确保动、静之间的密封。氢气控制系统用来实施充氢、排氢、补氢操作。正常运行时应自动维持氢的压力和纯度。图 2.3-22 为双流环式密封瓦的油系统，其简要说明见表 2.3-12。密封瓦油系统除有正常油源外还应有备用油源，以保证供油可靠。氢系统简图如图 2.3-23 所示。从制氢站将氢气引到气体控制站，减压后送入发电机。充、排氢均采用惰性气体置换法一般使用 CO_2。在充氢前，先从机座底部通入 CO_2 排除机内和系统中的空气，当 CO_2 的体积含量超过 85%时，再从机座上部通入氢排除 CO_2。排氢时则先用 CO_2 排除氢气，然后再用空气排除 CO_2。在发电机的风扇前后分别设有氢回流管，与系统中的氢气干燥器连通，使机内一部分氢在风扇的压差作用下，不断流经干燥器，以维持氢气的干燥。

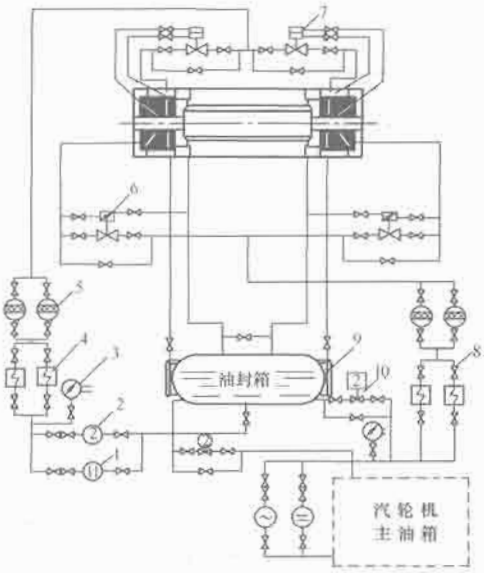


图 2.3-22 密封油系统简图

1—直流油泵；2—交流油泵；3—电接点压力表；4—冷却器；5—过滤器；6—压差阀；7—平衡阀；8—阀门；9—油位信号器；10—电磁阀

表 2.3-12 密封油系统

油系统	油系统路径	说 明
空气侧油系统	汽轮机主油箱→交流油泵→油冷却器→油过滤器→分传动端、非传动端两路→压差阀→密封瓦→发电机轴承→汽轮机主油箱	压差阀用来使密封瓦处空气侧油压比机内氢压高 0.05～0.08kPa
氢侧油系统	油封箱→交流油泵→油冷却器→油过滤器→分传动端、非传动端两路→平衡阀→密封瓦→油封箱	平衡阀用来使密封瓦空气和氢两侧油的油压始终保持一恒定值，并使其压差不大于 50mm 水柱。油封箱可将油内所含氢分离出来，送回发电机。油封箱的油位高低由油位信号器和电磁阀或浮子阀自动控制

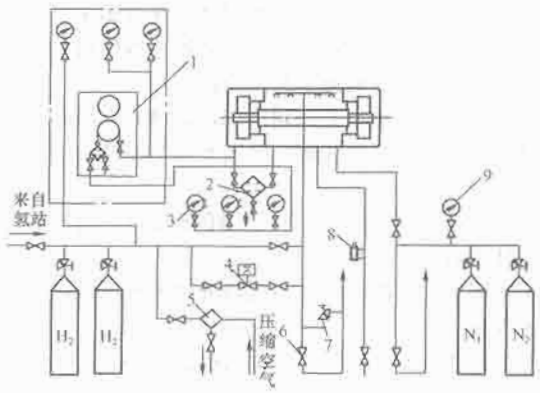


图 2.3-23 氢系统简图

1—氢分析器；2—氢干燥器；3—电接点压力表；4—电磁阀；5—空气过滤器；6—阀门；7—安全阀；8—油位信号器；9—压力表

氢的湿度过大对护环应力腐蚀和定子绕组局部放电有不利影响。

氢分析器可自动对氢的纯度进行分析，如纯度低于 92%，分析器报警。氢压过低或过高，由电接点压力表和电磁阀组成的自动补氢装置自动补氢或排氢。

发电机如果在 24h 内漏氢量超过正常运行值的 1.5 倍或绝对值超过 $18m^3/d$ 就应考虑停机检查和消除漏气。

3.3.4 用氢作为冷却介质的安全问题

如氢的纯度在 4%～74%范围时，若遇明火就有爆炸的可能，因此，对氢冷电机应注意安全问题。

如励磁机和集电环有外罩，外罩内可能漏入氢，必须要有良好通风，以避免氢积聚。氢油系统元件必须经过 0.8MPa 的水压试验，禁止使用易碎和有气孔的材料，如铸铁。测量氢的仪表和控制装置如纯度计、电接点压力表、电接点温度计在运行中可能存留可燃性混合气体，因此内部电路应有防爆措施。至少要用两种不同的方法测定机内氢的纯度，以互相校核。

如果气体干燥器是干燥剂再生类型的，则应有仪器表明何时需要再生及何时完成。在再生过程中应避免空气进入。如用加热器，使其仅在再生期间工作。通常，加热器温度在 300℃以下。

严禁用氢直接置换空气，反之亦然。发电机中的氢必须用惰性气体进行置换，使纯度至少达到 90%以上，压缩空气只用于排出发电机内的惰性气体，用完后应立即拆除其连接管。

在发电机及辅助设备的邻近区域内不允许有明火作业（如焊接）、吸烟或其他引燃手段。

轴承油系统应预防可燃性混合气体的聚积，在适当位置安装连续运行的排气装置。如果轴承油箱内氢的体积含量超过 1%，应停机找漏。

电机内氢压超过氢冷却器中的水压或绕组内水系统中的水压，当水系统密封不良时，就有可能导致氢泄漏至水中。在找漏时，应对冷却器和绕组内水系统的密封性进行检查。当水内冷系统中，氢的体积含量超过 10%时，或当内冷水系统中漏氢量大于 $5Nm^3/d$，应立即停机处理。

如果采用分相隔离母线，当封闭母线外套内的氢的体积含量超过 1%时，应停机找漏。

对厂房应有合理的通风量，使厂房内的氢气的体积含量为 0.6%及以下，大大低于 4%的爆炸下限。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3.4 水内冷发电机

水比氢具有更好的冷却性能，现代大容量汽轮发电机已广泛采用定子绕组水内冷。由于氢内冷转子结构比较成熟，目前采用转子绕组水内冷的还比较少。

水内冷电机有三种冷却方式的组合，即全水冷（定、转子绕组水内冷，定子铁心水冷），水水氢（定、转子绕组水内冷，定子铁心氢冷）和水水空（定、转子绕组水内冷，定子铁心空冷）。水水空方式可以避免由氢冷却带来的结构和维护方面的复杂性，定、转子温升低，外形尺寸小，便于运输。

我国生产的水内冷转子采用中心孔进水，表面出水的水路系统，它能够充分利用转子自身的泵水作用，增加水路长度，减少并联的水支路，从而简化了结构和工艺，降低了成本。

水内冷汽轮发电机必须采取措施防止水路漏水、堵塞、腐蚀和断水，对引水结构件、转子进出水结构等应精心设计和制造。对在导体内流动的冷却水的水质也有一定要求，漏氢尚可运行，而漏水则需停机，因此，与氢冷相比增加了复杂性，降低了固有的可靠性。

3.4.1 定子绕组结构

（1）定子绕组线棒

定子绕组线棒通常以一根空心导线和2～4根实心导线为一组，由若干组分两排组成，如图2.3-24所示。大容量发电机采用四排导线并列的线棒。为降低定子绕组的附加损耗，避免因铜腐蚀造成的堵塞，也有空芯线用不锈钢代替铜的结构。

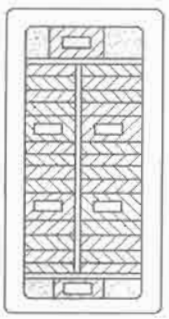


图2.3-24 水内冷定子线棒剖面图

空心导线高度一般为4.5～5.5mm，内孔高度一般为2mm，壁厚为1.25～1.5mm。根据传热需要，定子绕组水路有两种布置方式：对于容量较小的电机，通常采用一个线圈一条水支路，进出水在同一端；对于容量较大的电机，通常采用一个线棒一条水支路，进出水各在一端。总进出水管一般从下面进水，从上面出水。采用两路进水可使进入线棒各支路的水流流量更为独立。为了进行耐电压试验和测量绝缘电阻，国内设计的总进出水管对地应有电气绝缘。一般水速为1～2m/s，水压为0.2～0.3MPa。

（2）定子线圈水接头

定子线圈的水接头有两种结构：一种是将一根线棒的所有空心导线单独抽出，封焊后套上水接头（见图2.3-25），其优点是能直接检查空心导线有无堵塞和股线之间的缝隙是否已被焊料填满；另一种是将水接头直接套在线棒端头上一次焊接（见图2.3-26），然后用反光镜对空心导线内孔进行检查，并检查各空心导线之间的流量偏差，以保证无堵塞现象。600MW定子线圈水接头采用后一种结构，在专用设备上施行中频焊接。焊接后除检查有无阻塞外，尚需进行水压与流量试验。

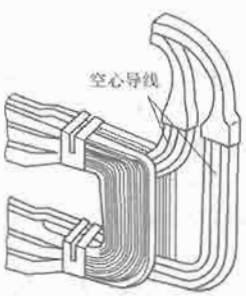


图2.3-25 空心导线单独抽出的定子线圈水接头

（3）定子线圈绝缘引水管及其接头

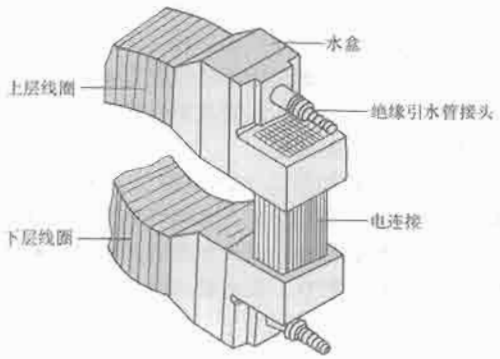


图2.3-26 直接套在线棒端头上的定子线圈接头

定子总进出水管处于地电位，它们与各定子线圈之间需用绝缘引水管连接。目前所用的聚四氟乙烯塑料管绝缘性能好，化学性能稳定，耐老化性能优越，但它的力学性能和耐磨性差。因此，在结构布置方面，应避免相互接触或与其他零部件接触，还应尽量避免过小的弯曲半径。定子绝缘引水管与线棒水接头之间的接头常用扣压结构，如图2.3-27所示。

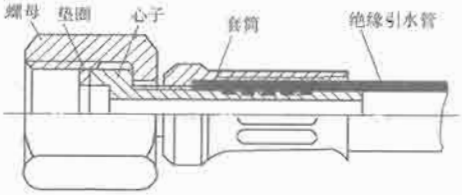


图2.3-27 定子绝缘引水管的扣压式接头

600MW及以上容量发电机常用黑色氟塑料成形压制的绝缘引水管，它的防氢气渗透性能比较好。

3.4.2 转子绕组结构

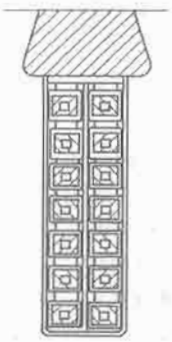


图2.3-28 转子槽剖面

水内冷转子线圈一般是每槽两排，每排为6～8匝，如图2.3-28所示。通常采用壁厚均匀的外方内方空心导线，其内孔截面积和铜截面积之比约为0.2。转子导线除导电、通水外，还要承受由导线内水的离心力所产生的水压作用。大容量电机超速时导线内的最大水压可达20～25MPa。为了承受这一压力，导线壁厚一般应为4～5mm。水内冷转子绕组常采用电路串联、水路并联的方式。较小的电机常采用每槽所有线匝为一条水支路，较大容量的电机则每槽中的两排线匝各构成一条水支路。

在水内冷转子绕组中，水路并联的引导结构复杂，因此，并联的水支路少，每条水路最长的可达几十米。

水冷转子绕组的冷却水从转子进水装置进入转轴的中心孔，由辐向孔流经进水箱、转子线圈绝缘引水管分配到每条水支路，冷却线圈后再经过绝缘引水管汇集到出水箱。冷却水从进水箱进入转子线圈的底线，并由转子线圈的面线进入出水箱，因而可依靠本身的离心压力从转子甩出。进水在非传动端，出水一般在传动端，但也有将进、出水都放在非传动端的。转子线圈内的水速为3.5～6.5m/s。

转子进出水箱都处于地电位，线圈与进出水箱之间装有绝缘引水管，其长度应能承受转子额定电压，并考虑直流的电解腐蚀作用。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

转子线圈引水管，俗称转子线圈拐脚。中小容量汽轮发电机利用转子绕组导体作为线圈拐脚，采用悬挂式护环—中心环结构的转子线圈拐脚采用不锈钢管弯制，以承受疲劳与拉伸应力的作用。不锈钢引水管从靠近转子本体处引出，并埋在转轴槽内两用槽楔固定。

转子进、出水箱如图 2.3-29 和图 2.3-30 所示，进水箱由不锈钢水箱环和水箱盖组成。水箱环热套于转轴后，与轴同钻铰径向孔，然后将经过退火处理的黄铜衬套和密封盖在孔内胀紧，以保证水密性。出水箱与转轴间的不锈钢套是为了防止转轴被锈蚀。

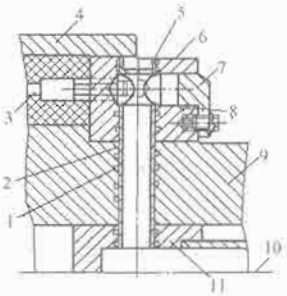


图 2.3-29 转子进水箱及其在轴上的装配

1—胀管环沟；2—衬管；3—转子绝缘引水管及其接头；4—小护环；5—密封盖；6—水箱环；7—水箱盖；8—密封圈；9—转轴；10—转轴中心线；11—中心管

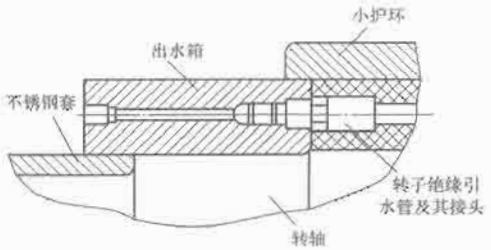


图 2.3-30 转子出水箱及其在轴上的装配

3.4.3 转子进出水装置

进水装置用来将冷却水引入转子，其结构如图 2.3-31 所示。高速旋转的转子进水管与不动的水套之间用盘根密封，盘根的松紧用压盖螺钉调节。为防止盘根发热，压盖不能压得太紧，允许有少量滴水。同时另备有盘根冷却管，作为因故断水时冷却盘根。转子进水管用不锈钢制成，盘根用含石墨的石棉，必要时可在进水管与外接水管之间放置橡胶

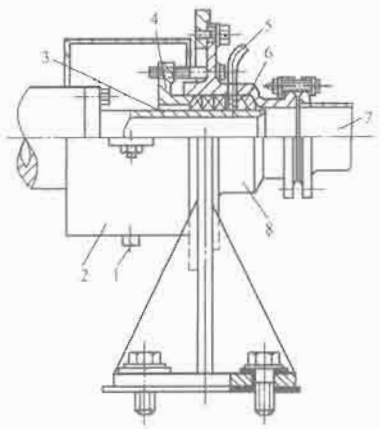


图 2.3-31 转子进水装置

1—泄水口；2—罩子；3—转子进水管；4—压盖；5—盘根冷却管；6—盘根；7—外接水管；8—水套

减振环或垫，以提高运行时盘根的稳定性。转子进水管设在励磁机外面，进水法兰及支架均需对地绝缘，以防止产生轴电流。

冷却水由转子甩出后由出水装置下部的出水口排出，经外部水系统冷却后再循环使用。出水装置（见图 2.3-32）由上、下盖组成，结合面低于轴中心线。上盖备有视察窗，用于运行时监视，该装置由不锈钢板焊成。

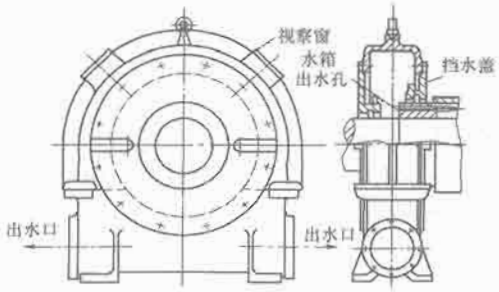


图 2.3-32 转子出水装置

3.4.4 双水内冷外部水系统

该系统一般采用闭式循环，如图 2.3-33 所示。水系统保证进入电机的冷却水的压力为 0.05～0.3MPa，水温不超过 40℃，电导率为 0.5～1.5μS/cm。为了不影响水质，系统中的管道用不锈钢管。系统中的其他元件，如水泵、冷却器等接触水的部分，必须采取防锈、耐腐蚀措施。

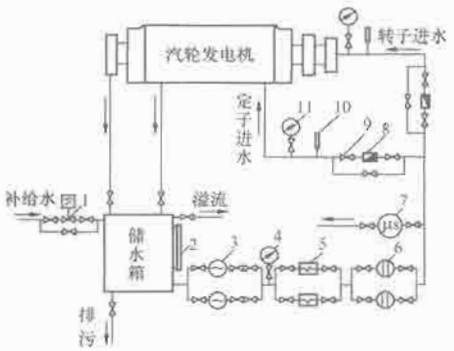


图 2.3-33 外部水系统简图

1—电磁阀；2—液位信号器；3—耐腐蚀泵；4—电接点压力计；5—冷却器；6—过滤器；7—电导率仪；8—流量计；9—阀门；10—温度计；11—压力表

3.5 核电用发电机

当前我国电力结构中，火电占的比例过大造成煤炭运输紧张，环境污染加重，今后加快发展核电势在必行。

核电用汽轮发电机与常规火力发电厂用汽轮发电机相比，除在冷却方式、结构、性能、励磁方式、大件运输等方面相似外，还有下列特点：

1）容量大、品种少。为了降低核电成本，充分利用燃料运输方便的特点，核电厂单机容量一般都在 1000MW 级以上，而且品种、规格少，标准化程度高。

2）自动化程度高。由于单机容量大，可靠性要求高，因此，机组的整体自动化水平要求高，发电机的在线监测与诊断系统应用较广。

3）带基本负荷长期运行。由于核岛内核燃料棒升降控制系统很复杂，另外，考虑到核安全问题，一般核电机组只带基本负荷而不考虑调峰运行要求。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4）发电机可采用全速或半速。发电机采用全速或半速由汽轮机决定。目前，国外已投运的单机容量大于900MW的核电机组中，大多数为半速机组（1500r/min）。其主要原因是核反应堆供给汽轮机的蒸汽参数低、蒸汽流量大、湿度高，目前要制造1000MW以上的两极机，技术上难度较大。另外半速机的可靠性也优于全速机。表2.3-13列出了规格相同的全速与半速机的比较。从表中可见，半速机转子质量是全速机的173%，定子质量为全速机的118%，总重为1.1～1.2倍，效率比全速机高0.19%，材料为122%，制造成本为全速机的115%左右。

表2.3-13 全速机与半速机的比较

项 目	单 位	全速机	半速机
额定容量	MW	1000	1000
功率因数		0.9	0.9
定子电压	kV	24	24
转速	r/min	3000	1500
转子电流	A	7580	7020
转子质量	t	86.5	150
定子质量	t	400	472
初始瞬态电抗 X''_d	%	28.7	31.5
效率	%	98.7	98.89
单位材料消耗	kg/kVA	0.49	0.6
成本	%	100	115

从电磁特性来看，由于四极机极距短，使端部漏磁和损耗有所减小，四极机每极励磁安匝较两极机的少，且转子槽截面积大，转子槽可放入更多的铜线，从而使转子铜损耗下降。四极机转速低，通风损耗一般为两极机的50%。综合以上结果，四极机的效率高于两极机的效率。四极机定子端部漏抗较两极机的小，但定子槽漏抗增加，总的定子漏抗较两极机的大，最后导致瞬态与初始瞬态电抗约增大30%，使短路电流和短路电动力减小，但瞬态稳定性下降，这可通过提高励磁调节性能来弥补。

从机械特性来看，四极机转子直径大，转子刚度好，临界转速高，动平衡较方便，也不易产生油膜振荡。两极机转子大齿与小齿方向刚度差别大，为补偿刚度差，需在大齿上开月牙槽。对四极机来说，刚度均匀，不必另加措施。

四极机因转速低，护环的热套应力也较两极机的低，缓解了应力腐蚀和低周疲劳引起的寿命损失。

四极机定子铁心的振动节点为八节点，两极机为四节点。虽然四极机铁轭高度较两极机的小，刚度较差，但其固有振动频率却大大提高，从而使定子铁心振动减小。因此，四极机的定子机座与铁心连接可不必采用隔振结构。

两极机的轴承在设计时除要考虑其承载能力外，更重要的是要考虑轴承的稳定性。为此，全速大型汽轮发电机广泛采用分块瓦轴承，以提高轴承的稳定性。而四极机轴承负载大，运行转速低，所以轴承稳定性已不再是个问题。综上可见，在机械设计方面，半速汽轮发电机的难度比全速机的小。

虽然四极机用料多、成本高，但是从可靠性第一出发，1000MW级发电机应优先采用半速机。

3.6 燃气轮发电机

燃气轮发电机在基本技术要求上与常规火电站用发电机差别不大，但在机组的布置方式、起动方面和出力定义方面有所差异。

燃气轮机联合循环电站机组的布置有两大类型，如图2.3-34所示。一是双轴布置，燃气轮机单独拖动一台发电机，燃气轮机排出的余热气体进入余热锅炉，在余热锅炉内产生的蒸汽送给蒸汽轮机，蒸汽轮机自己单独拖动另一台发电机，两台发电机的功率分别对应燃气轮机和蒸汽轮机，燃气轮机的功率一般比汽轮机功率大1倍。另外一类是单轴布置，燃气轮机、蒸汽轮机和发电机按顺序连接在一起，可以按燃气轮机、蒸汽轮机和发电机按顺序连接在一起，也可以按燃气轮机、发电机和蒸汽轮机顺序连接在一起，发电机的功率相当于燃气轮机和蒸汽轮机的输出功率之和。

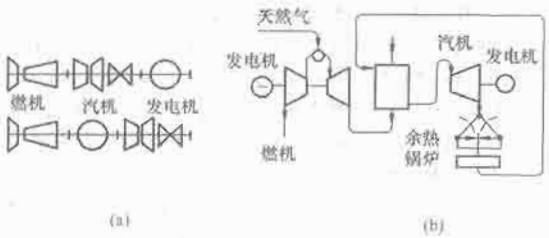


图2.3-34 燃气轮机联合循环电站机组的布置
（a）单轴；（b）双轴

国内用得较多的是9E双轴180MW和9F单轴400MW两种机型。由于作为原动机的燃气轮机是由同轴的压气机将进入的空气压缩，在燃烧室与喷入的燃油或天然气混合燃烧形成的高温高压气体推动燃气轮机叶片做功，为了先将空气压缩，一定要有其他的拖动力来起动燃气轮机。

F级燃气轮机一般将发电机先作电动机来拖动燃气轮机升速，让压气机工作，在机组转速能产生足够轴功率后，发电机与外部供电电源脱开，由燃气轮机拖动整个机组升速到额定转速，然后发电机加励磁、升电压、并网发电。另外也可用变频电源起动。

燃气轮发电机组主要应用于紧急备用、列车电站、承担尖峰负荷等。由于核电只带基荷运行，因此需要相应的调峰机组配套。

燃气-蒸汽联合循环发电装置是目前热力发电技术中热效率最高的一种。目前工业用燃气轮机组成联合循环热效率可达50%以上。20世纪90年代末期发展了功率为300MW的燃气轮机，这样，由燃气轮机组成的联合循环装置容量可达450MW左右。将来燃煤发电厂的发展方向是煤气联合循环。配燃气轮机的汽轮发电机有如下特点：

1）结构简单。目前用于与燃气轮机配套的发电机通常都采用空气冷却的快装式结构。除转子外，可整体运输到安装地点，将转子插入定子后，接上油、水、电的接口就可运行发电。

2）机组机动灵活。发电机为空气冷却或氢冷，运行维护简单；起停方便，每年可达500次左右；加载迅速，特别适合于调峰运行。

3）可用变频电源起动。起动时，当发电机的转速升至额定转速的一半时，燃气轮机才投燃料继续升速。起动方式有发电机转子通直流电，定子接变频电源作同步起动或者用直流励磁机起动（小容量发电机）。

4）出力。制造厂应提供在电厂现场最终冷却介质温度规定范围内的基本出力曲线。典型的燃气轮发电机出力曲线如图2.3-35所示。由图可见，与常规汽轮发电机不同，燃气轮发电机有额定出力、基本出力和峰值出力三个不同的工况。

①额定出力。燃气轮发电机的额定出力是指在额定频

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

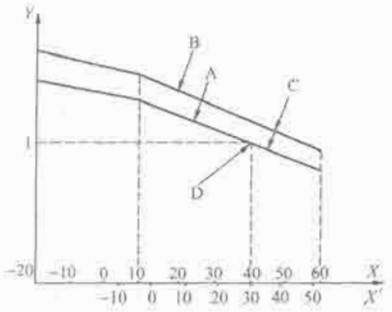


图 2.3-35 典型的燃气轮发电机出力曲线

横坐标—温度（℃）；纵坐标—发电机视在功率（标么值）；D—额定点；A—基本容量；B—峰值容量；C—温差 15K；X—初级冷却介质温度；X′—对闭路冷却电机用空气或氢作初级冷却介质的次级冷却介质

注：1. 本曲线提供了冷却介质温度超过规定时的出力。对带冷却器的电机只显示次级介质温度。两种标尺仅仅是为了表示曲线形状。

2. 若初级冷却介质温度不在（−20～+60）℃范围内，因为性能要另行协商，出力不包括本曲线内。

率、额定电压和额定功率因数以及电厂现场的初级冷却介质温度为 40℃时，发电机出线端的视在功率，即图中的额定点。

②基本出力。是指电机在额定频率、额定电压和额定功率因数时，按现场运行规定的最终冷却介质温度范围，电机温升按规定修正后的视在功率。基本出力曲线是一条直线。

③峰值出力。是指电机其他条件与基本出力的相同，温升再高 15K 时的视在功率。峰值出力曲线与基本出力曲线是平行的。通常，发电机按基本出力运行。

带峰值出力时可短时运行，但会缩短电机寿命。

4 关键材料

汽轮发电机使用的材料规格品种很多，归纳起来分为结构材料、导电材料、导磁材料、绝缘材料四大类。这些材料的化学成分、力学性能、电磁性能、绝缘性能均有严格的要求。机组容量不同，使用的材料差别很大。近年来，随着材料工业的进步，推动了汽轮发电机产品的发展。表 2.3-14 列举了一台国产 300MW 汽轮发电机（氢水冷却）所用的关键材料。

表 2.3-14 300MW 汽轮发电机关键材料

材料名称	主 要 性 能	应 用
26Cr2Ni4MoV 锻件	$\sigma_b \geqslant 735$MPa $\sigma_{0.2} \geqslant 650$MPa $\delta_5 \geqslant 17\%$ $\psi \geqslant 50\%$ $A_k \geqslant 88$J F_{ATT} {本体 −15℃ / 中心体 +10℃} $H = 50000$A/m $B \geqslant 2.05$T	转子本体
Mn18Cr18 锻件	$\sigma_b \geqslant 1070$MPa $\sigma_{0.2} \geqslant 1070$MPa $\delta_5 \geqslant 15\%$ $\psi \geqslant 60\%$ $A_k \geqslant 75$J（95～105℃）	转子护环
Be-Co-Zr 锻件	电导率≥45%① $\sigma_s \geqslant 583$MPa $\sigma_b \geqslant 686$MPa $\delta_5 \geqslant 15\%$ HRB≥92	转子端头槽楔
锆铜锻件	$\sigma_s \geqslant 275$MPa $\sigma_b \geqslant 343$MPa $\delta_5 \geqslant 12\%$ HRB≥50 电导率≥85%①	转子导电杆 导电螺钉
含银铜线 5.9mm×34.2mm	电导率 100%① $\sigma_b \geqslant 240$MPa	转子线圈
硬铝	$\sigma_s \geqslant 275$MPa $\sigma_b \geqslant 420$MPa $\delta_5 \geqslant 10\%$	转子槽楔
间苯二酚玻璃布加 NHN	E（室温）≥39kV/mm σ_b（150℃）≥202MPa 抗弯强度（150℃）≥176MPa 体积电阻率（150℃）≥ $1.2 \times 10^{13}\Omega \cdot$cm	转子槽衬
聚四氟乙烯布	摩擦系数 $f = 0.03 \sim 0.04$	转子滑移层
20g 钢板	$\sigma_s \geqslant 225$MPa $\sigma_b \geqslant 400$MPa $\delta_5 \geqslant 24\%$ $A_k \geqslant 27$J	定子机座
34CrNi3Mo 板材	$\sigma_s \geqslant 735$MPa $\sigma_b \geqslant 853$MPa $\delta_5 \geqslant 13\%$ $\psi \geqslant 35\%$ 硬度＝241～285HBS	定子弹簧板
0Cr18Ni10 钢板	$\sigma_s \geqslant 206$MPa $\sigma_b \geqslant 520$MPa $\delta_5 \geqslant 40\%$ 硬度≤187HBS	定子出线盒
无氧铜 4.7×9.9/2×7.2	$\sigma_b \leqslant 260$MPa $\delta_5 > 30\%$ 电导率≥100%①	定子空心铜线
硅钢片 0.5DW315-50	$p_{15/50} \leqslant 3.1$W/kg $B_{50} \geqslant 1.59$T	定子铁心冲片
ZG25Mn18Cr4 铸钢	$\mu \leqslant 1.1$ $\sigma_s \geqslant 157$MPa $\psi \geqslant 20\%$ $\delta_5 \geqslant 15\%$ $\sigma_b \geqslant 353$MPa 硬度＝170～230HBS	定子压圈
桐马玻璃粉云母带 9545-1	$E \geqslant 33.4$kV/mm（室温） 室温时 $\tan\delta = 1.46$ 155℃时 $\tan\delta = 4.96$ $\Delta\tan\delta$（0.24）＝0.25 抗弯强度（155℃）为 68.5MPa A_k（室温）＝102kJ/m²	定子主绝缘 $U_N = 20$kV 单边厚为 5.3mm
半无机漆	层间绝缘电阻≥$2 \times 10^9\Omega$ 漆膜附着力为 1 级 漆膜热压收缩率为 6.68%	定子硅钢片漆

① 相对电导率，即与纯铜电导率之比。

5 励磁系统

5.1 原理

励磁系统是指能按给定规律为同步发电机提供励磁电源的系统。有关同步电机励磁系统本身的详细细节见第 2 篇第 8 章，图 2.3-36 是励磁控制系统原理。

5.2 性能指标

励磁系统的作用有性能指标的定量要求。

1）维持发电机端电压为给定值。维持电压恒定的能力用励磁控制系统的静差率 ε（%）表示，它不大于 ±1%

$$\varepsilon = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

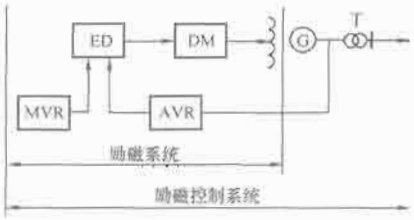


图 2.3-36 励磁控制系统原理框图
G—同步发电机；T—出口变压器；ED—提供励磁电流的电源；DM—灭磁装置；AVR—自动励磁电压调节装置；MVR—手动励磁电压调节装置

式中，U_0为空载额定时发电机的端电压；U_N为无功补偿单元退出时，发电机额定工况下端电压。

2）合理分配并联运行发电机之间的无功负荷。在励磁控制系统中设有调差单元，当发电机无功过分增加或减少时，适当地调整无功输出，以适应发电机本身无功输出的承受能力，其指标为电压调差率，又称无功电流补偿率 m（%），即同步发电机在功率因数等于零的情况下，无功负荷从零变化到额定值时，发电机端电压的变化率为

$$m=\frac{U_0-U}{U_0}\times 100\%$$

式中，U为发电机无功电流等于额定值时端电压，要求 $m\leqslant \pm 10\%$。静差率 ε 和调差率 m 是励磁系统主要静态指标。

3）提高电力系统的输送功率极限。励磁系统通过强励提高了动态稳定性从而提高了电力系统的输送功率极限，强励时间为 10s 就足够了。励磁系统顶值电压倍数和励磁电压上升率（或称励磁系统标称响应）为两项主要动态指标。

$$K_U=\frac{U_{fmax}}{U_{fN}}$$

式中，K_U为顶值电压倍数；U_{fmax}为最大励磁顶值电压；U_{fN}为发电机额定励磁电压。

K_U对 100MW 及以上的汽轮发电机一般不低于 2 倍。对于励磁电源取自发电机端的静止励磁系统，其励磁顶值电压倍数应按发电机端正序电压为额定值 80%时计算。

对慢速惯性励磁系统如直流励磁机和常规交流励磁机带整流器系统的励磁系统标称响应 U_E用下式表示

$$U_E=\frac{\Delta U_E}{0.5U_{fN}}$$

即由励磁系统响应曲线确定的 0.5s 内的平均励磁电压增量如图 2.3-37 所示，此时面积 S_{abc}应等于 S_{adb}。

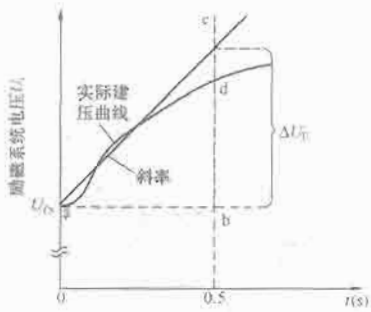


图 2.3-37 励磁系统标称响应 U_E的确定

对高起始响应励磁系统如自并励静止励磁系统，响应比按图 2.3-38 所示考核，即在规定的条件下，励磁系统达到顶值电压与额定磁场电压之差的 95%所需的时间，该值要小于或等于 0.1s。

具有高起始响应的励磁系统其 0.5s 的平均励磁电压上升率 U_E与强励顶值倍数近似于下式关系

$$U_E=4(K_U-1)$$

因此，只要具有 1.5 倍顶值的高起始响应的励磁系统其平均励磁电压上升率即可达到 2 单位/s，所以对高起始响应励磁系统，无须重复考核 U_E。

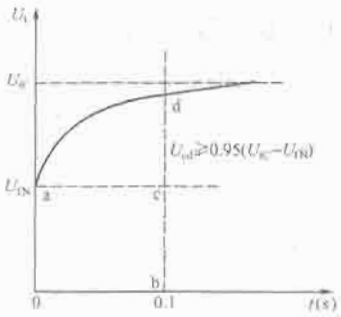


图 2.3-38 高起始响应特性

4）对发电机进行灭磁以减少事故损失。

5）对发电机和励磁系统的有关参数进行超值限制和保护。

5.3 常用励磁系统

数十年来，同步发电机的每一种励磁方式都与当时的技术水平和生产需要紧密相关。早期发电机励磁容量小，半导体整流技术尚未出现，所以绝大多数采用同轴直流励磁机的励磁方式。由于高速直流励磁机容量受换向器换流能力和离心力的限制容量到 500kW 已达极限，于是就出现了齿轮减速或电动发电机组的低速直流励磁机方式。20 世纪 60 年代起出现了大功率半导体整流元件，于是现代中大型同步发电机常用励磁方式有

励磁方式
- 他励式同轴交流励磁机
 - 静止整流器励磁
 - 旋转整流无刷励磁
- 自并励静止励磁

事实上，同轴交流励磁机静止整流器励磁的优势不明显，也处于淘汰边缘。无刷励磁和自并励静止励磁具有如表 2.3-15 所列各自的优缺点，确定了它们的使用范围：无刷励磁适合使用在防爆防火不需要维护的场合或励磁电流大于 6000A 以上的特大型机组上，其他为自并励静止励磁。

表 2.3-15 两种励磁方式的比较

励磁方式	优 点	弱 点
无刷励磁	1. 励磁设备占地面积小 2. 励磁电流大小不受集电环和电刷限制，免去了对集电环和电刷的维护 3. 没有集电环电刷接触导电产生的火花	1. 有励磁机和旋转整流轮，因此轴系较长，造价较贵 2. 一旦出故障备用励磁很困难 3. 只能间接测量励磁电流 4. 只能自然灭磁
自并励静止励磁	1. 反应速度快 2. 除集电环外没有旋转部件，提高了可靠性 3. 无励磁机缩短了轴系长度 4. 可实现反向负励磁灭磁	1. 有集电环和电刷，维护工作量较大 2. 励磁电源取自发电机端，使电源失去独立性，一般不宜在弱小电网或自备电厂中采用 3. 励磁容量受集电环装置通流能力的限制

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

6 大型透平发电机的几个特殊问题

在大型汽轮发电机正常运行方式中，还包括对进相运行要求、对调峰运行的要求、对承受不平衡负荷的要求，对这些要求，要从电磁结构方面在设计时事先考虑并采取措施加以满足。

大容量汽轮发电机的定子是超限、超重的部件，在设计评审或在签订供货合同时应会同铁道、交通部门确定可行的运输方案。

6.1 进相运行

为防止电网轻载时容性阻抗造成的电压升高，要求发电机能进相运行以吸收无功功率，进相深度按 0.95 设计。试验证明只要定子铁心端部措施得当，进相 0.95 时端部结构件温升就不会超过标准限值，而端电压过分下降是进相运行的首要限制。

大容量汽轮发电机定子铁心端部，特别是压圈内圆和端部齿根的局部发热是比较严重的。解决的措施通常有：采用无磁性压圈或无磁性分块压板，端部绕组支撑件采用非磁性金属材料或绝缘材料，铁心齿部开径向窄槽，铁心端部做成阶梯形。

对功率为 200MW 及以上的发电机，通常采用如图 2.3-6所示的结构。磁分路环的锥形面引导漏磁均匀地进入叠片，避免了漏磁过分集中于铁心齿根或压圈内圆，从而达到降低这些部位的局部损耗与温升的目的。

采用磁分路环时，铁心端区的漏磁通总量是会增加的，应正确设计分路环的锥度和轴向尺寸，可在磁分路环内设置通风沟，以加强冷却。

电屏蔽环用铜或铝等电导率高的材料制成。漏磁被电屏蔽环中感应的涡流所产生的磁通削弱，并迫使一部分漏磁改变路径。屏蔽环的厚度和安装位置对屏蔽效果有重要影响，要通过端部磁场的计算或试验才能确定。此外，还应使屏蔽环有良好的冷却，屏蔽环的厚度最好大于电磁波的透入深度，一般铜屏蔽环为 12～20mm，铝的为 26～30mm。屏蔽环与压圈之间的接触要良好或不接触，否则运行中在接触不良处将产生火花或过热。

6.2 调峰措施

由于电网峰谷差变大，火电机组必须具备调峰运行的能力。

火电机组用于调峰有两种方式：一是两班制运行，每日在负载高峰时起动一次，燃气轮发电机和部分机组，当前在大电网里就需担负这种任务；另一种是机组不停，在燃煤锅炉不投油助燃情况下，允许机组负载在 100%～30%之间变化。为满足调峰要求，在电机设计上应采取下列措施：

1）应注意改善转子大轴、护环、槽楔、风叶的低周疲劳特性。

2）定子绕组端部支撑系统在负载变化时，应能沿轴向自由收缩，以消除热应力。而整个定子绕组在径向、切向都要刚性固定。

3）转子绕组系统内采用滑移层材料，当负载变化时，转子绕组轴向能整体自由伸缩。

4）转子绕组采用含银铜线，以提高蠕变强度。

5）水冷绕组进水处装设自动调节水温装置，按负载调节水量，以保持定子铜线恒温。

6）定子线棒绝缘要采用 F 级环氧粉云母材料，并提高绝缘的机械强度和电气强度。

对两班制运行的电机，运行 10 年后应对转子主要金属部件进行全面探伤，以确定有无裂纹存在。

特别是转子槽部鸽尾部分应关注是否有微裂纹的产生和发展。对两班制调峰运行的电机，转子在它的使用寿命期限内，在机械上应能承受的起动次数不少于 10000 次（寿命按 30 年计）。

两班制运行的发电机，大部分时间需要盘车运行。但是长期盘车运行对有些结构会引起损坏，例如在气隙取气斜流通风方式中，把两根铜线当一匝使用，两根裸铜线之间由于长期盘车产生的位移，相互摩擦而生成铜粉。从而引起转子绕组匝间短路。因此设计方面应采取相应措施以减少这方面的损害。

6.3 不平衡负荷承载能力

有时电网存在着大容量单相负荷，如电气机车、电炉炼钢等。另外，长距离高压输电线的对地容抗也很难平衡，因此电机应能承受一定数量的稳态和瞬态负序电流。当三相负荷不对称，且每相电流均不超过额定定子电流 I_N，其负序电流分量 I_2 与额定电流 I_N 之比（I_2/I_N），与故障运行（I_2/I_N）^{2} 和时间 t 秒的乘积应符合 IEC 规定，见表 2.3-16。

表 2.3-16 不平衡负载运行限值

项号	电机型式	连续运行时的 I_2/I_N 最大值	故障运行时的 $(I_2/I_N)^2t$（s）最大值
	间接冷却的转子		
1	空冷	0.1	15
2	氢冷	0.1	10
	直接冷却的转子		
3	≤350MVA	0.08	8
4	>350～900MVA	$0.08-\frac{S_N-350}{3\times10^4}$	$8-0.00545\ (S_N-350)$
5	>900～1250MVA	同上	5
6	>1250～1600MVA	0.05	5

注 S_N 为额定容量（MVA）。

由于汽轮发电机容量的增加主要是靠电磁负荷增加，而转子体积增加有限，因此，I_2 和 I_2^2t 随容量增加而降低。

当三相定子电流不平衡时，电机气隙中将有负序旋转磁场，它在转子本体表面的金属体感应出两倍工作频率的电流，其路径如图 2.3-39 所示。这一两倍工频电流在有关金属件中产生附加损耗，引起温升，在电流经过的某些相互配合的接触面处，会引起局部灼伤。

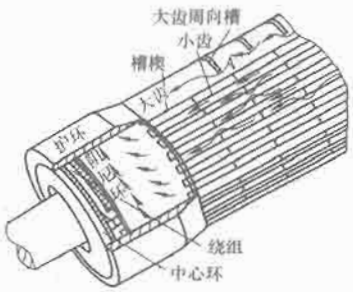


图 2.3-39 转子两倍工频电流的路径

此外，严重的不对称负荷也是引起电机异常振动的原因之一，电机承受不平衡负载的能力主要受金属件（主要是槽楔）的允许温度的限制。通常，对硬铝槽楔，在长期不对称

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

负载运行时允许温度为120℃，瞬时不对称负载运行时的允许温度为200℃。对于中小容量的汽轮发电机，依靠其转子本体表层和槽楔的阻尼作用，即能满足对它提出的不对称负荷运行能力的要求，为了避免护环与本体接合面的灼伤，有些设计在接合面镀银。大容量汽轮发电机的定子电负荷较高，在不对称负荷时，感应的两倍工频电流也较大，而转子表面的谐波附加损耗密度本来就已经较大。因此，要另设阻尼绕组，以降低转子表面层损耗，使金属温度不超过允许限值。阻尼绕组由铜线制成，主要有图2.3-40所示的几种类型。

1）梳齿式。梳齿部分伸入槽内的轴向长度为200～300mm，并压在槽楔下，形成笼型结构，如图2.3-40（a）所示。

2）将不分段的铜排置于所有的转子槽楔下作为阻尼条，并在两端护环下用铜板将所有阻尼条连通形成阻尼笼，如图2.3-40（b）所示。

3）再在大齿上开出若干槽，放置通长的扁铜排与护环下的铜板连接，如图2.3-40（c）所示。这样还可减少大齿表面、特别是月牙槽两端处因电流的集中而引起的局部过热。

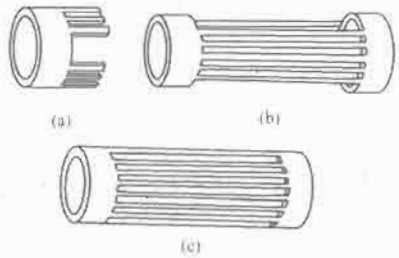


图2.3-40 阻尼绕组

为减轻在各段槽楔接头处两倍工频电流绕经小齿，使其发生局部过热，可在各段槽楔接头处采用适当搭接等措施。

为改善护环与本体间的接触，增加电流导通能力，在护环配合面上镀银。

6.4 定子运输问题

大容量汽轮发电机的定子是超吨位超限运输件。一般铁路凹形车皮的承载不超过200t，定子机座外径限制在3.8m左右只能运输300MW定子。为满足这些要求，可采用三段机座结构，即将立式冷却器安装在两端罩内，机座与端罩可分开运输，到工地再组装。也可采用背包式冷却器结构，即冷却器放在机座顶上，可与机座分开运输；或采用内、外机座方式，内、外机座分开运输到工地再组装。

600MW机定子质量超过320t，铁路运输时可用专用钳夹式运输方式（见图2.3-41）。此时，运输工具均需专门设计。若电站临近沿海，也可采用公路、海路联合运输，先将定子装在专门的汽车上运至港口再下船海运。

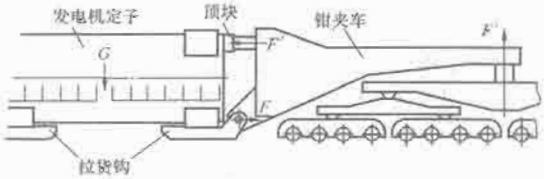


图2.3-41 底钩钳式装车

7 安装与维护

汽轮发电机安装工作是非常细致复杂的，它随容量的大小和冷却方式的不同而不同。

7.1 安装前检查

安装前要仔细阅读制造厂的产品说明书，了解产品的安装参数，包括定、转子质量及外形尺寸，应了解随机供应的安装材料及工具的使用方法。

电机开箱后、安装前由订货方、制造厂、安装单位共同进行下列各项检查：

1）检查机内的清洁度。

2）检查转子轴颈的椭圆度和锥度，以及联轴器端面的平行度。

3）检查定子绕组、转子绕组的直流电阻和绝缘电阻。

4）检查定子埋置检温计的绝缘电阻。

5）检查励磁机端轴承的绝缘电阻，并仔细阅读出厂试验记录。

6）检查励磁机、励磁系统及氢油水系统。

机组基础应平整，无裂缝、蜂窝、麻面和露筋等现象，基础固有振动频率应避开转子的临界转速以及工作转速所对应的旋转频率。

7.2 定子安装

在确定定、转子和励磁机的相对位置时，要考虑转子在负载情况下因温度升高而产生的轴向热膨胀，以及汽轮机转子轴向伸长对发电机转子轴向位置的影响。为了保证满载时发电机定、转子两者的磁中心之间的误差在±1mm范围内，安装时应按产品说明书要求将定子铁心中心线向非传动端移动相应距离。每台定子安装时，要按定子静载荷试验调节底脚垫片。

7.3 转子安装

转子安装是项重要工序，首先要完成转子插入前的所有检查项目以免返工。如转子中心孔气密试验、转子冷态直流电阻测量、转子绕组静态交流阻抗、转子绕组绝缘电阻测量、转子通风孔检查等，并将测量值与制造厂提供值进行比较，如果转子受潮，要对发电机转子先进行加热处理，使其绝缘电阻恢复后才可将其穿入定子膛内。现场转子加热要参照转子加热曲线。

穿转子具体步骤按制造厂提供的图样进行，切记在穿抽发电机转子时应严禁将护环、集电环、风扇座环等要害部位作为受力点。对热套的联轴器对100MW以上发电机不要使用接长轴法穿抽转子，因为这容易使发电机联轴器变形。大容量发电机穿抽转子通常使用滑块法，轴颈和本体使用滑块，定子铁心和转子槽楔都有保护工具，小车可在导轨上滑行。装两端风叶时要对号入座并注意风扇叶的方向，按图样规定力矩把紧固定螺母，并锁好止动垫片。

发电机的最终找正工作应在基础二次灌浆彻底结束后进行。大机组调找中心要在发电机充额定压力空气下进行，联轴器涨口偏差，轴承中心高要严格按汽轮机厂给定的数值进行。电刷使用前应进行适形研磨，这对保证通流导电性能很重要。空载时要测量集电环温度注意温度是否均匀，才能继续增加磁场电流。

7.4 轴承及油密封安装

为了保证轴承受力均匀和使轴承内润滑油不会经轴承盖与轴承座间的合缝面外泄，其间隙用0.05mm的塞尺检查时，塞尺应不能通过。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

为了克服轴瓦在低速时的浮动，轴瓦球面与轴承座之间按过盈或间隙 0.02～0.04mm 安装。轴瓦球面与轴承座之间或端盖式轴承的轴瓦与瓦套之间的接触面积均要求达到80%以上。轴承的瓦面最好不要再研刮。通常圆轴承挡油盖与轴档之间的上部间隙为 0.25mm，下部间隙为 0.15mm。两侧间隙为 0.20mm。但这些间隙不是定值，与轴承档直径有关。如果使用接触式油档，请按厂家说明书进行。

环式密封瓦的安装要求如下：

1）密封座的合缝面要严密，每平方厘米上至少有三或四点接触。

2）瓦的侧面与座要平行，瓦对轴的两侧总间隙要符合图样要求。

3）瓦的移动应灵活，轻拨即能转动，切勿卡死。

4）密封瓦座与轴要垂直同心。下半密封座与轴的同轴度误差应小于 0.1mm。

5）在密封瓦与轴间垫入 0.1mm 厚的绝缘纸板时，用500V 兆欧表测得密封座与端盖之间的绝缘电阻应不小于1MΩ。有油用万用表测。密封油档的安装与轴承档油盖的相同。

按要求包扎好过渡引线绝缘，然后进行定子绕组内部水系统的流通性和密封性试验。接着预装端盖，进行定子单独气密试验，初装轴承，插入转子，找完发电机中心，组装轴承油密封，安装电刷架，连接好氢、油、水系统，在转子静止状态下，充气进行发电机总体气密试验，最后进行定子绕组耐电压试验，开机前要查清所有测温元件的电阻值及与端子板接头的相应位置关系。发电机的漏氢量考核要在发电机投入运行后才进行。

7.5 维修检查

新装机组运行一年后，必须进行一次全面的检查，项目不得少于大修内容。重点是若定子槽楔有松动应重新再打紧。以后大修间隔期为五年左右，小修间隔期为一年左右。随着检测技术和诊断技术的发展，将来的发展方向是以预检、预修代替定期检修。

7.5.1 小修项目

小修原则上不拆端盖，不抽转子，但对空冷电机可以拆卸端盖。小修检查项目大致如下：

1）清除可触及部分的粉尘、油污。

2）清理定子绕组冷却水系统的过滤器，并对定子绕组进行反冲洗。

3）清理密封油过滤器，清理氢气干燥器。

4）调换电刷极性。

5）检查可触及的把合螺钉、定位销等的紧固性。

6）检测定子绕组各相直流电阻。

7）检测各相绕组、定子汇流管、电阻检温计、轴承等对地绝缘电阻。

8）检测转子绕组冷态直流电阻、静态交流阻抗及对地绝缘电阻。

7.5.2 大修项目

大修除完成全部上述小修项目外，还有：

1）检查副励磁机、主励磁机、发电机与汽轮机的转轴中心线位置，如有变化，必须重新找正。

2）清理端盖、风扇罩、轴瓦、密封瓦、定子出线罩及定子引出线套管。

3）检查定子绕组、连接线、过渡引线的固定情况。

4）检查定子铁心边端、齿压板有无松动。

5）检查定子绕组手包绝缘情况。

6）检查定子槽楔楔紧情况。

7）如果发现定子绝缘引水管有磨损、电弧烧伤、漏水等情况，应及时更换。

8）进行定子绕组内部水系统的密封性和流通性试验。

9）清理转子本体、护环、中心环、风扇叶片、风扇环、联轴器、集电环，检查平衡块的紧固情况。

10）检查转子本体、护环、风扇叶片的表面情况，如果有机械损伤、电烧蚀，或有细微裂纹，应及时处理，有条件时应进行护环及中心孔的探伤。

11）清理转子通风孔，做通风检查，所得数据与安装前的实测值若有明显差别时，应找出原因并及时处理。

12）对定、转子绕组进行预防性电气试验。

13）清理氢冷却器并做水压试验。

14）检查轴瓦钨金有无划伤、龟裂、脱层等现象。

15）检查密封瓦尺寸和密封座与轴颈之间的间隙。

16）检查挡油盖与转轴之间的间隙。

17）测量励磁机端密封座的对地绝缘电阻及励磁机端挡油盖的对地绝缘电阻。

18）总装完成后，进行发电机的整体气密试验。

19）与发电机本体大修同时，应进行励磁系统，氢、油、水辅助系统的大修，其检查项目应按说明书进行。

8 试验

本章所涉及的仅是成品试验，不包括零部件或半成品的试验。试验是为表明电机的设计制造是否与设定的标准相吻合，偏差是否符合规定。

试验种类分为型式试验、出厂检查试验、交接试验、考核试验、科研试验五种，每种试验的试验项目随试验目的而异。对温升、效率、振动、噪声、电磁兼容等电机重要性能指标的试验方法，采用全世界公认的 IEC、ISO 标准系列，国内也有与之对应标准，如 GB/T 1029《三相同步电机试验方法》。

8.1 型式试验和出厂检查试验

对新产品和设计、工艺、材料做过重大改变的电机，首台产品必须在出厂之前进行全面的试验，这就是型式试验。型式试验结果是该型产品评审鉴定的主要依据之一。出厂检查试验又称常规试验，它是每台电机制造期间或完成后必须进行的试验。

汽轮发电机型式试验和检查试验项目如下：

*1）绕组、埋置电阻检测计、绕组相间及轴承等对地绝缘电阻测定。

*2）绕组、电阻检温计在实际冷状态下直流电阻的测定。

*3）定子铁心损耗发热试验。

*4）转子动平衡和超速试验。

*5）耐电压试验（包括整机起晕电压试验）。

*6）不同转速下励磁绕组交流阻抗的测定或波形测定。

*7）定子绕组接头检测。

*8）定子绕组端部模态及固有振动频率的测定（200MW 及以上）。

*9）定子绕组端部手包绝缘施加直流电压的测量。

10）空载特性的测定。

11）稳态短路特性的测定。

12）效率测定。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

13）突然短路机械强度试验。

14）全谐波畸变（THD）的测定。

15）电抗和时间常数的测定。

16）短时升高电压试验。

17）空转机械检查，并测定轴承油温和振动值。

18）噪声测定。

19）温升试验（在安装地点进行）。

20）短时过电流试验（直接冷却电机在安装地点进行）。

21）额定励磁电流和电压调整率的测定（在安装地点进行）。

22）定子铁心、机座、定子绕组振动的测定。

带*的为检查试验项目。转子超速时是否要加热、是否每台发电机要在厂内进行总装气密试验，这些都由制造厂决定。

8.2 交接试验

安装后应按产品技术条件规定进行各项交接试验。对氢冷电机要进行气密试验，确定漏氢量。对氢内冷转子，要检验转子通风孔和检查氢、油辅助系统的工作情况。对水内冷电机，要注意检查绕组内部水系统流通性和密封性。

上述这些试验的试验方法、限值和评价都有相应的标准规定，但需要注意的是时序。安装氢内冷转子前，先进行中心孔气密试验，然后进行转子通风孔检查和耐电压试验。安装水内冷转子前，先进行转子绕组内部水系统密封性和流通性试验，然后再进行交流耐电压试验。定子就位后，先组装氢气冷却器和安装定子出线装置，按要求包扎好过渡引线绝缘，然后进行定子绕组内部水系统的流通性和密封性试验。接着预装端盖，进行定子单独气密试验，初装轴承，插入转子，找完发电机中心，组装轴承油密封，安装电刷架，连接好氢、油、水系统，在转子静止状态下，充氢进行发电机总体气密试验，最后进行定子绕组耐电压试验，发电机的漏氢量考核要在发电机投入运行后才进行。安装前由订货方、制造厂、安装单位共同进行清洁度检查以确认机内无异物存在，安装后交接试验主要目的是确认电机安装后再次试验结果与电机出厂时应无显著差别。

安装后交接试验项目如下：

1）绕组、埋置电阻检温计、轴承等对地绝缘的绝缘电阻的测定。

2）绕组和电阻检测计在实际冷态下直流电阻的测定。

3）耐电压试验，试验电压为出厂试验值的80%。

4）轴系振动测量，包括测轴承温度。

5）空载和稳态短路特性的测定。

6）定子绕组端部手包绝缘施加直流电压的测量。

7）励磁绕组交流阻抗或波形的测定。

8）发电机冷却系统流通性及密封性检查。

9）测量轴电压。

对氢冷电机型式试验、检查试验和交接试验还应增加：

1）油密封绝缘电阻测定。

2）气密试验、交接试验时，应确定漏氢量。

3）氢内冷转子通风孔检查。

4）氢、油系统检查试验。

对水内冷电机型式试验、检查试验和交接试验中尚需增加：

1）定子总进、出水管绝缘电阻的测定（若带绝缘）。水内冷转子需测进水支座绝缘电阻。

2）绕组内部水系统流通性检查。

3）绕组内部水系统密封性检查。

4）冷却水系统检查试验。

8.3 考核试验

考核试验是按合同规定的试验项目、试验方法进行电站现场考核。如果考核结果未达到合同保证值，就要按合同规定进行经济赔偿。

出力、效率、振动值、噪声、漏氢量是汽轮发电机最常见的考核试验项目。考核试验一般由制造厂和用户之外的第三方（如电力试验所）主持并出具试验报告。

8.4 科研试验

我国汽轮发电机发展大致可分为三个阶段：1954年～1959年仿制阶段，北仿苏、南仿捷，容量生产到50MW。1960年～1980年为自行开发阶段，这段时间是在完全封闭的环境中，自力更生、边干边学摸索前进，容量做到300MW。1981年至今是改革开放走向世界的新阶段。上面介绍的这些设计、结构、安装、运行经验说明，引进技术直接应用国外的科研成果，避免从头摸索，起点较高不失为应急之计。但是引进以后要吸收消化、优化改进还得靠自己。因此，科研贯穿始终，是开发创新的必不可少的前提，科研试验是制造部门、使用部门、科研院校的共同任务。汽轮发电机上已应用的主要科技成果见表2.3-17。

表2.3-17 主要科技成果

序号	类别	课题名称	解决的主要问题
1	电磁理论	定子绕组换位技术研究	选择合理结构，减少附加损耗
2		提高负序能力研究	确定了材料、结构、计算方法
3		定子端部发热与损耗	降低了端部温升，减少了损耗
4		网机关系研究	分析了非正常运行参数和限值
5	通风冷却	气隙取气斜流通风研究	提高转子绕组通风冷却能力
6		转子绕组副槽通风研究	确定副槽通风参数
7		冷却器性能研究	试验比较各种冷却器性能
8		三维流场和三维温度场计算	确定流阻、散热系数、温升
9	结构研究	大直径轴承研究	降低损耗，提高稳定性
10		大电流集电环研究	降低发热，减少损耗
11		钕铁硼永磁中频机开发	开发永磁副励磁机
12	强度振动	定子结构动力学研究	计算机座、铁心、绕组振型、振频
13		轴系计算	包括临界转速、扭振计算、振动响应
14		零部件刚、强度计算和测量	如机座、护环、大轴等
15		疲劳断裂研究	对齿头，水冷转子引水线等进行研究
16	绝缘研究	定子F级主绝缘的开发	开发了F级铜马环氧粉云母带
17		高云母含量粉云母带的研究	提高云母含量，提高介电强度
18		22kV级防电晕结构和工艺	一次成型防电晕材料和结构
19		水溶性半无机硅钢片F级漆	耐温高，涂层薄，收缩量小

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

序号	类别	课题名称	解决的主要问题
20	金属材料应用	26Cr2Ni4MOV 锻件	提高了大轴性能
21		1Mn18Cr18N 护环钢	解决了护环应力腐蚀问题
22		低损耗硅钢片	提高导磁性能，降低损耗
23		各种性能的铸、锻件	端头槽楔、定子压板、定位筋等
24	辅机研究	开发出三种励磁系统	交流励磁三机系统、无刷励磁系统、静态励磁系统
25		多功能、数字式 AVR 研究	智能式、多功能、数字化
26		集装式双流环式油密封系统开发	集装式、高可靠、不漏油
27		集装式定子水系统开发	集装式、高可靠、多功能
28		氢气自动干燥器研制	降低了发电机机内湿度
29	冷却技术开发	双水内冷关键技术的开发	解决定子、转子水路结构、工艺、材料，使之不漏水
30		氢内冷的研究	使温度分布均匀，降低平均温升，提高冷却能力
31		空气冷却关键技术的研究	保持效率不过分降低前提下，提高容量极限

表 2.3-17 中每一项都是大课题，在它下面还有很多子课题，举例来说，气隙取气斜流通风研究就包括表 2.3-18 所含内容。秦山核电 650MW 发电机利用型式试验机会进行了大量的科研试验，有的科研试验在设计制造中预先就埋置了测量元件。

表 2.3-18 转子气隙取气斜流通风研究

序号	类别	课题名称	解决的主要问题
1	设计改进	中间铣孔方式槽内通风	降低绕组平均温升
2		气隙隔环研究	比较了各种隔环的降温效果
3		端部风路研究	开发了一路、一路半、两路不同系统
4		转子绕组温度分布计算	确立了有限元计算程序
5		转子绕组温度分布实测	在全电流下实测 300MW、600MW 温度分布
6		风斗形状选择	比较了各种风斗的取风系数和损耗
7	工艺进步	开发一斗二路转子槽楔	减少槽楔上孔的数目
8		自制自动铣孔机	提高了精确度和生产率
9		自制自动去毛刺机	提高了劳动生产率
10		数控加工转子槽楔	保证形状和尺寸、表面粗糙度
11		改进端部进风位置	由底部改为侧面进风利于通畅
12		转子通风孔检查方法和标准	检查流通性，避免通风孔堵塞
13		护环止口加工方法	下线前加工，避免金属末侵入
14		线匝采用直角四角焊	保证线圈形状
15		波形法检查转子匝间短路	提高了测试精度

秦山核电 650MW 发电机在型式试验阶段完成的科研试验有：

1）临界转速测量。

2）轴承功耗及油膜厚度测量。

3）定子铁心端部发热试验。

4）定子铁心和机座振动测量。

5）定子引线和绕组热水流试验。

6）机座、端盖、水压试验应力与变形测量。

7）定子绕组振动模态及振幅测量。

8）转子绕组温度分布实测（转子全电流）。

9）总风量及各风区风量分配实测。

10）定子线棒标准雷电波冲击试验。

这些科研试验对指导今后的设计工作很有意义。

9 发电机运行

各种冷却方式的发电机其运行要求有所差异，本节仅以水、氢、氢冷却的 600MW 为例加以叙述，所示图表仅作参考。其他典型的发电机也有类似的指导运行的曲线或图表，它由制造厂设计计算提供，电厂也应试验核实。另外，本节只谈发电机的正常运行，有关非正常运行的要求见 10 节。

9.1 起动前检查项目和要求

在发电机的主、辅设备以及其他有关设备的安装工作结束后，由机组的使用单位及安装、调试单位根据专门的试运大纲进行整套机组设备的起动、试运工作。

机组起动之前必须具备下列基本条件：

1）结束与机组直接有关的土建工程，具备所需的全部照明和局部重点照明。

2）结束发电机组的主、辅设备及其一次、二次线路系统（及其仪表电气设备）的安装工作。

3）完成发电机组交接试验项目中所有起动前的电气测量及试验。

4）所有安装记录、起动前的测量和试验记录以及主要设备的合格证书应齐全成册。

5）内冷水控制系统、氢气控制系统、密封油控制系统以及监测装置、信号装置、保护装置均调试完毕并投入工作。

6）安全措施及消防措施必须完备并得以实施。

7）结束轴承和油密封装置包括信号管路的通油清洗工作。这一冲洗最好持续 3 个月并确认进出油已达到完全合格状态。同时应检查轴瓦、密封瓦内有无杂物所造成的磨损和划伤现象。

8）控制密封油压，使其达到规定值范围。控制密封油压的方法见密封油系统产品说明书。

9）发电机内充氢至额定压力。充氢必须采用中间介质置换法，所用氢气、二氧化碳或氮气必须符合有关标准的要求。充氢的操作步骤见氢气控制系统产品说明书。

10）氢气冷却器通水，并且水量调至额定值。注意排气、防止气堵，同时调节回水阀门使循环水压达到运行压力。

11）定子绕组内通水，控制冷却水进出压力，并且使水量、温度和电导率等指标达到规定值，注意排气、防止气堵。

9.2 发电机组起动

1）发电机在转子盘车转速、定速过程中必须监测轴振动情况，并注意发电机内部有无动、静部件碰撞声、摩擦声或其他异常声音。如果发现异常情况，应立即停机，直到找出并消除异常现象的根源为止。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2）发电机转子转速的增长速度由汽轮机的起动条件决定，但必须注意不得在临界转速附近停留。

3）转子转速达到额定值后，除测量转轴情况外，还必须进行下列项目的检查：

①电刷与集电环接触状况。

②轴承与油密封装置的回油温度及轴瓦温度。

③励磁装置的情况。

④发电机与变压器及电网的相序是否一致。

⑤定子绕组的内冷水及氢气冷却器、油水冷却器、水水冷却器中的二次水的循环情况。

上述检查中，如果发现异常情况，应立即停机排除故障。

如果在起动过程中未发生异常情况可不停机，直接进行下一步试验及试运工作。待试运完成之后再进行轴瓦、密封瓦内部的检查与清理工作。

9.3 发电机组调试

发电机组的起动达到正常要求以后，则可进行有关的调试工作。所有调试工作必须在冷却介质处于额定参数（压力、纯度、流量、温度、电导率等）下进行。

9.3.1 电气测试

此项工作须在额定转速下进行。

1）测量励磁回路的绝缘电阻值。

2）在转子绕组励磁状态下，通过测量轴端对地电压，检查轴承及油密封装置的绝缘情况。

3）其他测试项目。

9.3.2 保护装置的调试

在进行上述电气测试过程中，所有各项保护装置都要进行调试并投入运行。对于保护装置调试所需要的，但本说明书未规定的特殊运行方式，应与制造厂代表共同商定。

9.4 并网

发电机并网之前应完成的工作：

1）所有起动前的准备和起动工作。

2）有关的交接试验和电气试验。

3）所有保护装置调试完毕并投入运行。

4）将定子机座接地。

5）发电机可使用自动（或手动）准同步装置并入电网。

必须注意，发电机定子绕组在不通水或水质不合格情况下，严禁励磁升压及并网。

9.5 机组综合试运行

发电机并网及带上负荷后，发电机主、辅设备应进行168h的综合试运行。在综合试运行中，应按照要求进行监测和维护，并将监测结果记入综合试运行工作记录中。

在事故情况下，如果转子绕组和定子绕组过载，但未超过有关规定的数值，且发电机的电压未超过额定值的110%，则应不干涉自动励磁调节装置和强行励磁装置的工作。

9.6 整套机组试运行结束

如果机组在连续运行168h中未发现明显的问题，而且平均有功负荷不低于80%额定值，那么168h连续运行结束后，应对发电机进行全面检查。此时，不论试运行期间是否发现问题，应拆开端盖、轴承、油密封装置，检查轴颈、轴瓦、密封瓦、内外挡油盖等。如果转子轴颈有划伤，则应进行光滑处理；如果轴瓦和密封瓦上轴承合金有划伤，应用刮研的方法消除缺陷；如果油挡间隙增大，应设法消除。

如果在机组试运行过程中，发现轴振动超过允许值，则应仔细分析转轴的找中心情况、转子的动平衡情况及轴承部件有无松动情况等。

此外，应消除发电机及其管路、法兰、阀门等部件所存在的密封不严密现象。

9.7 发电机组交付运行

整套机组起动试运行工作结束后并消除了检查中所发现的缺陷后，即可将机组交付使用单位投入运行。正式交付运行时，应办好证明文件，并附上所有中间证明文件、安装、起动、试运行工作记录及有关技术方面的纪要等。

9.8 正常运行方式及规定

9.8.1 发电机长期连续运行

发电机在满足规定的有关技术数据及技术要求，同时又得到正确维护的条件下，能够长期连续运行。以600MW为例，发电机长期连续运行额定功率为600MW，最大连续功率为654MW。

发电机在不同工况下的运行能力如图2.3-1所示发电机容量曲线。

发电机在额定电压、额定功率因数和额定氢压下，不同负荷时的计算效率见表2.3-19，发电机负荷与损耗及效率关系如图2.3-42所示发电机损耗和效率曲线。

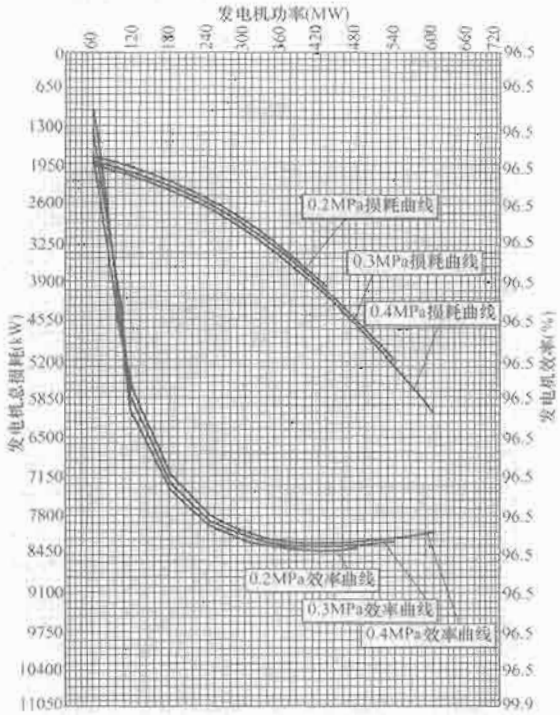


图2.3-42 发电机损耗和效率计算曲线

型号—QFSN-600-2YHG；额定容量—722.2MVA；额定电压—20kV；额定电流—19245A；额定功率因数—0.9；额定频率—50Hz；额定转速—3000r/min；额定氢压—0.4MPa；短路比—0.52；相数—3；额定励磁电压—428.1V；额定励磁电流—4128A

表2.3-19 发电机不同负荷时效率

有功功率（MW）	150	300	450	600	654
效率（%）	98.53	98.99	99.05	98.99	98.95

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

9.8.2 发电机空气冷却运行

发电机不允许以空气冷却带负荷运行。

如果需要短时空冷、空转运行或进行其他有关不通电的试验时，必须遵守下列条件：

1）油密封装置及其密封油控制系统投入工作。

2）机内空气压力保持在约 0.01MPa（表压），压缩空气充入机内前经过干燥和过滤，其绝对湿度不超过 10g/m³（20℃、0.1MPa 时）。

3）发电机冷却器投入工作。

4）每次空冷、空转运行持续时间不得超过 4h。

5）事先与制造厂代表协商。

9.8.3 发电机视在功率与电压和电流关系

当功率因数与频率为额定值时，电压在其额定值的 95%～105%范围内变动时，发电机视在功率与电压和电流的关系按表 2.3-20 中规定。

表 2.3-20 视在功率与电压电流的关系 单位：%

定子电压 / 额定定子电压	105	100	95
视在功率 / 额定视在功率	100	100	100
定子电流 / 额定定子电流	95	100	105

9.8.4 发电机变功率因数运行

发电机允许变功率因数运行，当降低功率因数时，转子励磁电流不允许大于额定值，而且视在功率应减少。当增大功率因数时，发电机的视在功率不能大于其额定值。

发电机功率因数变化时的允许运行负荷如图 2.3-43 所示发电机 V 形曲线。

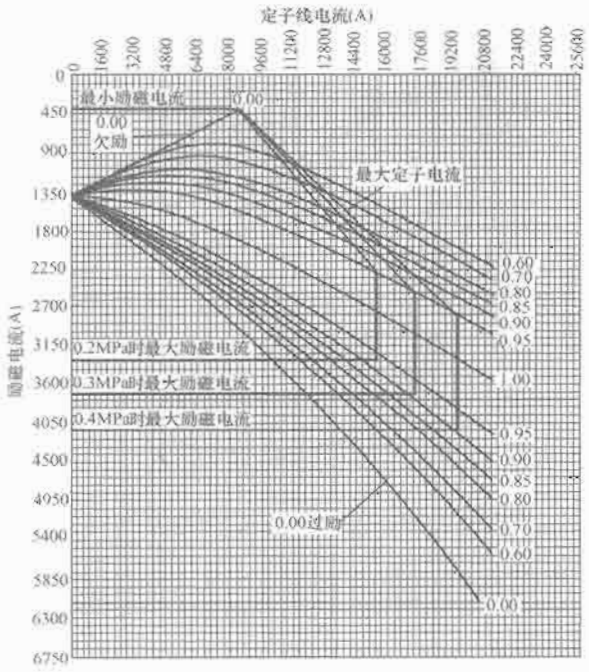


图 2.3-43 发电机 V 形曲线

型号—QFSN-600-2YHG；额定容量—722.2MVA；额定电压—20kV；额定电流—19245A；额定功率因数—0.9；额定频率—50Hz；额定转速—3000r/min；额定氢压—0.4MPa；短路比—0.52；相数—3；额定励磁电压—428.1V；额定励磁电流—4128A

9.8.5 不平衡负载运行

当发电机运行负载不平衡时，如果持续负序电流不超过额定电流的 8%，且每相电流不大于额定电流，允许发电机长期运行。

在极短时间内，发电机能够承受事故状态下的不平衡负荷。为了防止负序电流产生的损耗引起转子磁极表面和护环的局部过热和烧损，必须严格控制事故状态下的不平衡负荷及其时间。因此，规定负序电流标么值的二次方与事故时间的乘积不许大于 10s，即 $(I_2/I_N)^2 t \leqslant 10s$。事故负序电流的允许值和相应的时间按表 2.3-21 中规定。

表 2.3-21 负序电流和时间限值

t(s)	2.5	4	5	10
(I_2/I_N)(%)	200	158	141	100

9.8.6 发电机调峰运行

当电网需要时，发电机允许调峰运行。调峰运行有两种方式，即变负荷 30%～100%和两班制运行。

发电机每年起、停机允许 330 次，即在整个发电机使用寿命期限内，起、停机次数不超过 10000 次。

发电机负荷增减率，一般每分钟为额定负荷的 5%，但紧急状态下取决于汽轮机。

9.8.7 发电机进相运行

发电机进相运行的允许范围主要受发电机静态稳定和定子铁心端部构件发热两个因素的限制，发电机在结构上能满足在超前功率因数为 0.95 和额定功率的情况下稳定运行。

9.8.8 发电机频率与电压的变化范围

发电机在额定功率因数、电压偏离额定值±5%、频率偏离额定值+2%～−3%时能连续输出额定功率。

发电机在额定功率因数、电压偏离额定值±5%，频率偏离额定值+3%～−6%时，输出额定功率允许运行的时间按表 2.3-22 中规定。

表 2.3-22 偏频运行时间限值

频率（Hz）	寿命期累计时间（min）	每次持续时间（s）
51.0～51.5	30	30
48.5～51.0	连续运行	
48.0～48.5	300	300
47.5～48.0	60	60
47.0～47.5	10	10

注 电压升高同时频率降低工况可导致发电机和变压器过磁通量，电压降低同时频率升高工况可导致发电机旋转部件所承受的应力增大。这些因素将引起发电机温升增高和寿命的缩短，应尽快降低负荷或限制这些工况运行。

9.8.9 发电机运行氢压

发电机正常运行时，机内氢压必须高于定子内冷水的水压。特殊情况下需要降低氢压运行时，须与制造厂协商，且运行时间应不超过 4h，此时发电机允许负荷应根据温升试验确定。未经试验确定前的允许负荷可参考表 2.3-23。

表 2.3-23 低氢压运行参考数据

氢压(MPa)	有功功率(MW)	定子电压(V)	定子电流(A)	功率因数
0.3	549	20000	17321	0.915
0.2	498	20000	15396	0.935

9.8.10 氢气温度与负荷关系

当发电机冷氢温度为额定值时，其负载应不高于额定值的 1.1 倍；当冷氢温度低于额定值时，不允许提高发电机出

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

力：当发电机冷氢温度高于额定值时，每升高1℃时，定子电流相应减少2%。但冷氢温度超过48℃要及时处理，否则不允许发电机长期运行。

9.8.11 氢气冷却器与负荷关系

发电机正常运行时需投入两组、共四台氢气冷却器（每组两台），以维持机内冷氢温度恒定。当断开一台氢气冷却器时，发电机的负荷须降至额定负荷的80%或以下运行。

氢气冷却器进水温度超过额定值时，可根据运行氢压和氢温调节负载运行，如图2.3-44所示为发电机负载与氢气冷却器进水温度、氢气压力关系曲线。

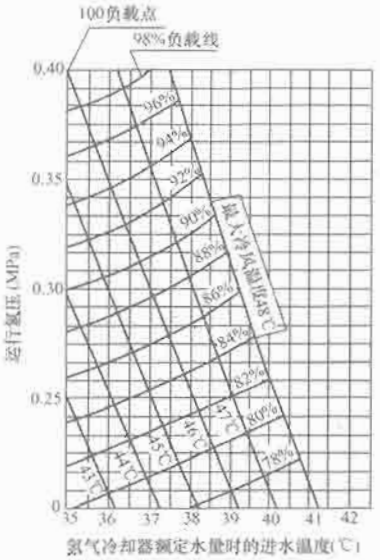


图2.3-44 发电机负载与氢气冷却器进水温度、氢气压力关系曲线

型号—QFSN-600-2YHG；额定容量—722.2MVA；额定电压—20kV；额定电流—19245A；额定功率因数—0.9；额定频率—50Hz；额定转速—3000r/min；额定氢压—0.4MPa；短路比—0.52；相数—3；额定励磁电压—428.1V；额定励磁电流—4128A；额定冷风温度—46℃；额定冷却器进水温度—35℃

注：1. 本曲线以发电机出力曲线为基础，4个可调参数中确定其中2个参数，另外2个参数随之确定。

2. 最大负载时，调节进水温度时要保证发电机实际运行的冷风温度不超过最大冷风温度。

3. 本曲线是发电机安全运行的指导，不等同于发电机的极限运行能力。

9.9 发电机保护

发电机的保护方式由电厂的设计部门制定，但发电机至少应设有下列运行保护：

9.9.1 继电保护类

（1）相间短路保护及差动保护

又分为发电机（纵差）和发电机变压器组（纵差）差动保护。功能是当相间短路时，将发电机与电网解列，同时解除发电机励磁。

（2）定子绕组接地保护

功能是当定子绕组接地时发出报警信号，并将发电机与电网解列，同时解除发电机励磁。

（3）转子绕组接地保护

功能是当绝缘电阻值降低到10kΩ时发出报警信号，当绝缘电阻值降到4kΩ及以下时，将发电机与电网解列，同时解除发电机励磁。

（4）异步运行保护

应符合本章10.1节规定。

（5）定子绕组过电压保护

功能是当定子绕组的电压高于额定电压的1.2倍时，将发电机与电网解列，同时立即（无延时）解除发电机励磁。

（6）负序电流过载保护

功能是当$I_2/I_N=0.08$额定电流时发出报警信号，并按$(I_2/I_N)^2t=10s$整定电流延时，将发电机与电网解列，同时解除发电机励磁。

（7）外部短路引起的过负荷保护

功能是当出现外部短路引起过负荷时，立即使发电机与电网解列，同时解除发电机励磁。

（8）零序保护

功能是当发电机出现零序电压时，立即发出信号，使发电机与电网解列，同时解除发电机励磁。应注意若零序保护动作需区别机内或机外，才决定是否跳闸。

（9）定子绕组对称过负荷保护

功能是当定子对称电流高于1.1倍额定电流时立即发报警信号，并按本章10.1条的规定整定时间，使发电机与电网解列，同时解除发电机励磁。

（10）转子绕组过负荷保护

功能是转子过电压时限特性应符合本章10.1条的规定。

（11）大气过电压和操作过电压保护

功能是当发生大气过电压或操作过电压时，来自变压器的冲击电压高于定子绕组额定电压的1.1倍时，使发电机与电网解列，同时解除发电机励磁。

（12）轴承绝缘监测装置

9.9.2 其他保护装置

（1）轴承断油保护

当发电机轴承润滑油流量低于700L/min并继续下降时，发电机同汽轮机应当跳闸停机。

（2）定子绕组过热保护

当定子绕组任何两个水路相同的同层线棒出水温度的温差大于8K时，应当发出报警信号。当此温差达到12K时，应立即将发电机与电网解列，同时解除发电机励磁。

（3）发电机定子绕组内冷水流量保护

当定子绕组内冷水流量降低至额定值的68%时，应当发出报警信号。当流量下降至额定值的52%时，应当发出事故信号，使发电机从电网解列，同时解除发电机励磁，如图2.3-47所示。另外，需注意在内冷水泵切换过程中不能发生断水现象。

（4）氢气冷却器中的水流量保护

当氢气冷却器中的水流量降至75%额定值时，保护装置应当发出报警信号；当流量继续下降至30%额定值时，保护装置延时3min，使发电机从电网解列，同时解除发电机励磁并停机。

9.10 运行监测和注意事项

1）为确保发电机的正常运行，除了设置各种必要的保护装置以外，还需为发电机配备各种必要的监视测量仪表及其信号装置、控制装置和自动化装置等，用于监控和记录有关机组运行状态、电气参数、冷却介质参数及机械参数。如有功功率、无功功率、定子电压、定子电流、转子电压、定子绕组温度、定子绕组内冷水压力和流量及进出温度、定子铁心温度、机内氢气压力和温度及湿度、氢气冷却器水温度和压力及流量、轴承和密封油温度和压力及流量、轴承合金

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

温度、轴振动和漏氢量等。而且须用自动记录仪表或指示仪表测量这些量值，并记录到相应的报表内。

其他参数亦应定期记录到相应的报表内。

应监测的参数项目及记录周期见表 2.3-24。

表 2.3-24 发电机监测参数项目及记录周期

序号	监测参数的项目	记录周期
1	有功功率	连续记录
2	无功功率	连续记录
3	定子电压	连续记录
4	定子电流	连续记录
5	定子绕组温度	连续记录
6	定子铁心温度	连续记录
7	内冷水进出水温度	连续记录
8	内冷水流量	连续记录
9	机内氢气压力	连续记录
10	氢、空侧密封油压、油温	连续记录
11	冷、热氢气温度	连续记录
12	轴瓦温度	连续记录
14	轴承回油温度及油量	连续记录
14	油密封装置油量	连续记录
15	氢气冷却器、空气冷却器、油水冷却器、水水冷却器进水温度	连续记录
16	轴承室内氢气含量	连续记录
17	轴颈和轴承振动值	连续记录
18	定子绕组水路及其外部内冷水系统内氢气含量	连续记录
19	封闭母线外壳内氢气含量	连续记录
20	氢油间压差	连续记录
21	水水冷却器及过滤器前后内冷水压力	每 4h 一次
22	机内氢气纯度（自动分析仪）	每 4h 一次
23	机内氢气定期化学分析	每 4h 一次
24	氢气冷却器及空气冷却器水流量	每 4h 一次
25	定子绕组进出水压力	每 4h 一次
26	励磁电压	每班一次
27	油水冷却器前后密封油温度	每班一次
28	内冷水化学特性	每班一次
29	内冷水电导率（固定仪表）	每班一次
	内冷水电导率（化验分析）	每周至少一次
30	过滤器前后密封油压力	每班一次
31	压差阀、平衡阀跟踪情况	每班一次
32	励磁回路绝缘电阻值	每班一次
33	定子绕组水路及其外部内冷水系统内氢含量（定期化验分析）	每班一次
34	机内氢气湿度（定期化验分析或用仪器）	每班一次
35	充氢前氢气湿度（化验分析）	每次充氢及补氢前
36	漏氢率及漏氢量	每昼夜一次及补氢时
37	轴振动值（定期就地测量）	每周一次

2）表 2.3-24 中未列出的其他监测参数应定期记录到相应的报表内。

3）如果配备了监测记录装置，则监测记录方式如下：

①被监测参数的测量周期为 7s（由集中监测装置自动实施）。

②正常运行方式下集中监测装置应每隔 1h 自动记录所有被监测参数。

③当被监测的任何一个参数超过允许值范围并发出音响信号，运行操作人员应立即使集中监测装置每隔 1min 打印一次已经偏离允许值范围的参数，并将该参数引到集中监测装置灯光信号盘上，以便于运行操作人员随时监视直至该参数恢复到允许范围内为止。

4）如果集中监测装置由计算机系统控制，其监测记录方式则如下：

①计算机系统储存器中被监测参数的记录周期不超过 30s。

②正常运行时，被监测参数自动接到打印装置上打出报表，时间间隔为 1h。

③当被监测的任何一个参数超出允许值范围时，应自动接到打印装置上（参数从偏离允许值范围至回到允许值范围内的全过程）。此时运行操作人员应当立即以相应幅面接到电子射线显示器上，以随时对偏离允许值的参数进行监测，直至该参数恢复到允许值范围内为止。

④当切断发电机的任何一个保护装置动作，即使一个参数超出第二整定值时，在保护装置动作之前 1h，应当自动打印出计算机系统存储器内存储的被监测参数的所有记录。

自动记录装置的纸带、集中监测装置或计算机系统打印装置上的打印报表应存档，其存档日期与机组控制盘相应的日报表相同。

9.11 偏离允许值时应采取的措施

（1）当任何被监测参数偏离允许范围时应遵循的原则和措施

1）首先应迅速查清监测装置是否发生故障或信号装置是否误动作，然后立即采取相应的措施，使异常参数复原或解列、灭磁、停机。

2）如果被监测参数突然超过允许值（发生短时突变情况），运行操作人员首先应迅速将发电机解列、灭磁、停机，然后再查清故障原因。未查清故障原因并消除之前，不许重新投入运行。

（2）具体情况的具体措施

1）发电机部件温度持续上升。当发电机定子绕组（层间或出水）温度、定子铁心温度等监测参数中的任何一项持续上升至允许值及以上时，信号装置自动报警。运行操作人员应迅速使发电机减负荷（有功功率及无功功率），直至该温度降至允许值以下为止。如果减负荷不奏效，应立即将发电机与电网解列，同时解除发电机励磁。

如果发电机任何两个水路相同的同层线棒出水温度的温差大于 8K 时，也应采取上述措施；当此温差达到 12K 时应立即将发电机与电网解列，同时解除发电机励磁，并停机查明原因。

2）发电机轴承温度及回油温度持续上升。当发电机轴承温度及回油温度持续上升时，可适当提高进油温度。如果温度超过允许值，应立即停机并检查原因。

3）发电机内积水。当发电机内发现少量（每班约 500mL）水时，应当将水排出并加强对发电机的监视。若每天漏液量超过 800mL 要报警。

如果机内继续积水，则必须依次断开氢气冷却器，以查

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

清哪台冷却器发生渗漏水故障，然后采取措施将故障清除。

4）定子绕组内冷水压高于机内氢压。当定子绕组内冷水压比机内氢压高时，应对此情况立即处理，使其压力恢复正常，同时监视线棒的温度以及机内是否有水放出。如果有水放出，应尽快停机，以便查清和清除隐患。

5）机内氢气指标偏离额定值。当机内氢气压力高于或低于额定值时，运行操作人员应立即排氢或补氢。当机内氢压急剧下降即漏氢量过大时，应尽快查清漏氢原因和部位，必要时应降负荷直至停机进行检查。

当机内氢气纯度下降至最低允许值时（95%），应立即采取补、排氢的方法，以提高机内氢气的纯度。同时，须查清密封油系统的平衡阀运行状态，必要时修复或更换。

当机内氢气湿度偏高时，将对绕组绝缘及转子护环等产生有害影响。因此，运行时机内冷氢气的绝对湿度必须低于$2g/m^3$（即在机外常压下取样化验热氢气中的水汽浓度不高于$0.4g/m^3$），且在任何运行方式下都必须保持这一数值。停机时，可用降低氢压或充入干燥氢气的方法维持这个湿度。

当机内氢气绝对湿度升高至$2g/m^3$以上时，必须找出原因，并采取措施消除根源。必要时可采取频繁充入干燥氢气的方法来降低氢气湿度（但应注意不要使氢气湿度降低太多）。

发电机在机内冷氢气绝对湿度在$2g/m^3$以上但不超过$2.5g/m^3$（机外常压下取样化验热氢气中水汽浓度不超过$0.5g/m^3$）的情况下运行，每年只允许3次，每次运行的持续时间不得超过3天。

由制氢站提供的氢气的露点温度应不高于−47.45℃（相当于$0.05g/m^3$）。

6）氢气冷却器及水水冷却器的水流量低。当氢气冷却器及水水冷却器内的二次水流量降低至额定值的75%时，信号装置报警。运行操作人员应适当减少发电机的负荷，同时，应采取措施使其恢复额定流量。

7）定子绕组进水温度和机内冷氢温度低。当定子绕组进水温度和机内冷氢温度低于允许范围时，应及时采取措施，使其恢复至允许范围（调节氢气冷却器及水水冷却器中的二次水温度或流量）。

在负荷大量减少或甩负荷时，为防止发电机因急剧冷却而造成的不良影响，必须接通内冷水再循环系统或减少外循环回路冷却水流量（在氢气冷却器为闭环路情况下）。

8）定子绕组内冷水的水质超标。当定子绕组内冷水电导率超过标准值到5S/cm时，信号装置应当报警。运行操作人员接到报警信号后，必须用新鲜合格的内冷水更换原内冷水，使电导率降至标准值以下。如果不能奏效，则当电导率达到9.5S/cm时，应迅速将发电机与电网解列，同时解除发电机励磁。

当定子绕组内冷水中pH值和铜离子含量超标时，亦须更换内冷水，使这两个数值达到标准值。上述定子绕组内冷水系统的充水和补水均须由经凝结水除盐装置处理后的汽轮机凝结水管道供给。

当内冷水中含有氢气且取样化验氢气含量超过2%时，应加强对发电机的监视。每隔一小时须用化验方法检测一次内冷水中的氢气含量。同时注意定子绕组各线棒的温度以及发电机内是否有水排出。此时，必须保证氢压比内冷水压高0.05MPa，并应尽快停机，最长应不超过3天，以便消除内冷水中出现氢气的根源。

如果每小时取样检测时发现捕集器中氢气含量超过10%，应迅速将发电机与电网解列，同时解除发电机励磁并停机消除故障根源。

9）发电机轴承室及主油箱内或发电机轴承回油中含氢气。当发电机轴承室及主油箱内或发电机轴承回油中的氢气含量超过1%时，必须尽快停机消除漏氢的根源。

10）发电机轴振动状况。发电机除在起动过程及在额定空转下须监测轴的振动状态以外，在带励磁及带不同负荷运行时亦须监测发电机轴的振动状态。监测通常采用设置在汽、励两端轴承外挡油盖上的非接触式拾振器在两个相互垂直方向上测量轴颈振动速度（方均根值）。如果机组常备测量仪器装置不能测量振动速度，允许测量双倍振幅值。

当各轴颈的振动值不超过3.3mm/s（或轴承座振动25μm，或轴颈振动76μm）时，允许发电机长期运行。

当发电机轴承振动值达到13.2mm/s（或轴承座振动120μm，或轴颈振动250μm）时，应迅速停机。

在机组稳定运行过程中，如果某个轴承振动值在原有稳定状态下，突然升高2.2mm/s（或轴承座振动值升高20μm，或轴颈振动升高40μm）时，应迅速停机处理。

10 网机关系及协调

随着高压大电网与大机组的不断发展，网机之间关系日趋复杂。大电网与大机组之间相互影响，有时保护机组与保护电网客观上是相互矛盾的因素。从电网角度要求机组有能力尽量适应电网各种非正常运行的需要，事实上为使机组设计得经济合理，从机组角度出发，要求电网加装保护措施以减少电网扰动对机组的影响，这样互提要求就形成了如何协调网机关系的问题。大电网、大电机、汽轮机、继电保护等分属不同的学科，制造和使用又分属不同的部门，这种跨学科、跨部门的结合就成为研究网机关系及其协调的前提。

10.1 非正常运行工况设计和应用导则

发电机的非正常运行是指电网扰动使发电机的电磁转矩突变，以致发电机输出转矩与汽轮发电机输入转矩之间失去平衡，使机组整个轴系发生扭转振荡并产生动态响应。汽门快关、突然短路、误同期合闸、开关重合闸等都属于非正常运行工况，非正常工况并不总是单一出现的，往往故障会综合发展，造成事故的并发。例如，单相接地会发展成三相接地，在事故扩大过程中将引起连续冲击，产生叠加振荡，增加转轴的寿命损失，在寿命期内机组起停占疲劳寿命损失的70%，其他留给非正常运行。

IEC 60034-3规定用外部方法将短路时相电流限制到不超过三相突然短路所产生的最大相电流值，则电机在额定负载和1.05倍额定电压下运行时，应能承受出线端任何形式的突然短路而不发生导致立即停机的有害变形，这就是发电机机械设计的依据。事实上发电机内部短路、近端故障切除、误同期等引起的电流和转矩均要大于上述这个依据，因此一旦发生这些事故，就要靠继电保护减轻事故的危害程度，继电保护的设计整定要求制定一个非正常运行导则，之所以叫导则意味着强制性不如标准，但也是值得参考的基准。国际大电网会议（CIGRE）综合各国经验进行了大量的调查研究、理论分析和试验研究工作，终于在1980年提出了“同步发电机非正常运行导则”。我国根据CIGRE的导则提出了透平型发电机非正常运行的若干规定，认真执行这些规定，肯定会减少对发电机和电网的损害。

1）失磁异步运行。试验表明当有如下条件时发电机可以短时异步运行：

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

①电网有足够的无功去维持合理的电压水平（$0.95U_N$）。

②机组能自动迅速减少负荷（锅炉和汽轮发电机的旁路要足够大）。

③连接到发电机出口的厂用变供电的辅机可自动切换到另一个电源。

间接冷却发电机，在定子额定电压下可带0.6倍的额定功率，此时定子电流不超过1.0～1.1倍额定值，失磁异步运行时间不超过20min；600MW及以下的直接冷却发电机失磁后应在60s内将负荷降至60%，90s内降至40%，总的失磁时间不超过15min。失磁运行的限制不是转子过热也不是转子绕组感应电压，而是过度的电压下降。

2）失步运行。失步是指由某种扰动引起失去同步但仍保持全部或部分励磁，这种运行方式对电机和系统都非常不利。首先会在轴上产生很高的应力，其次会牵涉网内多台发电机的电压和电流产生过度的振荡。如果外部电抗器足够限制发电机电流和转矩低于三相出口短路或线间短路的0.6～0.7倍，转差率小于1.5%允许机组失步运行至少5～20个振荡周期。对于600MW以上的机组，由供需双方另行商定。当失步振荡中心在发电机-变压器组内部时，应当立即解列发电机。

3）断水运行。水内冷电机允许的断水运行持续时间为30s，在此时间内若备用水泵不能恢复供水，就必须跳闸。

4）误并列。发电机在保证的寿命期内应能承受180°误并列5次或120°误并列2次。

5）定子过电流。额定容量在1200MVA及以下的透平型发电机应能承受1.5倍额定定子电流的过电流，历时30s而无损伤。过电流允许时间与过电流倍数按下式计算

$$(I^2-1)t=37.5s$$

式中，I为定子过电流标么值；t为持续时间，适用范围为10～60s。

发电机每年允许过电流次数不超过2次。

6）转子过电压。发电机应配备励磁过电压限制器。

转子绕组短时过电压能力如下：

励磁电压	(%)	208	146	125	112
时间	(s)	10	30	60	120

7）频率异常。频率异常属于应避免又不可能完全排除的非正常运行状态。限制机组在频率异常时运行因素主要为汽轮机叶片谐振。频率异常的运行能力应符合表2.3-25的规定。

表2.3-25 汽轮发电机组频率异常允许运行时间

频率范围 f (Hz)	允许运行时间	
	累计 (min)	每次 (s)
$51.0<f\leqslant51.5$	>30	>30
$50.5<f\leqslant51.0$	>180	>180
$48.5\leqslant f\leqslant50.5$	连续运行	
$48.0\leqslant f<48.5$	>300	>300
$47.5\leqslant f<48.0$	>60	>60
$47.0\leqslant f<47.5$	>10	>20
$46.5\leqslant f<47.0$	>2	>5

10.2 系统扰动后检查

对于容量较小的间接冷却发电机，通常都能承受额定电压、额定有功、额定功率因数下的突然短路。

一般在经受较大系统扰动后200MW及以下的间接冷却发电机不必强迫进行发电机检查，但是如果系统保护失灵，特别是扰动伴随着较大的负序电流，或长时间的失步运行等，则还是需要检查发电机的。

现代大型直接冷却电机出厂时不能在制造厂内进行全电压突然短路试验，又系统扰动可能比IEC标准规定还要严重，计算举例见表2.3-26。因此，在严重扰动之后，应当对大型发电机进行检查。所谓“严重扰动”有：

1）发电机出口也包括升压变高压侧三相或两相突然短路。

2）发电机内部突然短路或靠近发-变组附近的突然短路。

3）120°或180°误同期。

4）高转差率的异步运行和超过限度的失步运行。

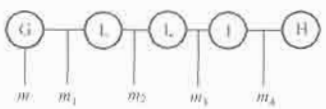
5）超过限值的负序电流运行。

6）汽轮机引起的转速异常上升。

必须检查的主要部件为：定子端部绕组固定和支撑，定、转子局部过热部件和可能松动的部件，发电机-汽轮机-励磁机之间的联轴器。特别是长时间带不平衡负荷或超速后，建议应抽出发电机转子检查转子情况。应根据特定异常运行情况将外观检查和某些试验和测量相结合，例如定子绕组分相交流耐压试验［(1.0～1.3) U_H］和分相直流泄漏电流测量，有时要测量定子绕组端部机械频率响应特性并与原有数据对比。如果用透光法发现定子端部支撑元件间有间隙就要及时处理。

总之，严重异常运行后要有真正有效的检查，以免留有后患。

表2.3-26 故障下的机组转矩



G—发电机；L—汽轮低压转子；I—中压转子；H—高压转子

故障类型		气隙电磁转矩 m	机械转矩				相对值（对 m_1）
			m_3	m_3	m_2	m_1	
满载下端头三相短路		4.91	0.70	1.61	2.63	2.77	1.00
误同期	$\delta=120°$	6.45	0.67	1.73	4.05	5.06	1.83
	$\delta=180°$	4.95	0.53	1.40	2.80	3.46	1.25
	$\delta=240°$	5.30	0.45	1.20	3.05	3.45	1.25
故障后电压恢复		3.12	0.75	1.90	3.72	4.06	1.46

10.3 协调网机关系

国内外的理论研究和运行实践表明，大电网与大机组的相互影响与协调会直接影响电网和发电机组的安全稳定运行。系统扰动或发电机本身突发故障时，使发电机进入非正常状态，如果处理不当，不仅可能导致发电机的损坏，还可能使电网失去稳定，甚至造成电网崩溃的特大事故。

要协调网机关系必须对各种非正常运行方式的危险程度

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

有所认识。实际危险程度由下列因素组成：

1）故障发生概率即故障的频繁程度，若故障越频繁，则对轴的疲劳积累就越大。

2）故障引起的最大应力概率

3）最大应力的潜在损坏危险。

由表2.3-27可见，例如，三相重合闸出现概率很低，但出现一次就可造成100%的轴疲劳寿命损失，因此，仍应避免这种运行方式。

表2.3-27是建立在研究各种电网扰动在汽轮发电机轴系各段所产生的扭转应力基础上提出的要求，进行计算还必须掌握轴材料的扭转疲劳寿命特性。为验证计算的精确度，美国、西欧都在相当数量的发电设备上装设了扭振监测装置，实测了疲劳寿命损失数据。

根据表2.3-27，协调网机关系的基本结果如下：

表2.3-27 扭振引起的汽轮发电机损坏危险率

	事故与扰动典型		A 扰动次数	B潜在损坏危险率最坏状况下发电机应力			C最大应力概率	最大应力参数	ABC总损坏危险率
				轴疲劳（%）	联轴器	定子绕组			
1类单激励	机组端子短路	高压侧	不频繁	<0.1	低	中	高	跳闸瞬间	中
		低压侧	不频繁	<1	中	高	高		中
	甩负荷、电路跳闸		频繁	<0.05	低	低	中	系统状况，相角，转差率	低
	误同步		不频繁	<20	很高	很高	中		中
2类双激励	事故排除	二相事故	中	<0.1	中	中	低	事故距离，跳闸瞬间	低
		三相事故	不频率	<10	高	中	低		低
3类多激励	高速重合闸	一相对地事故	很频繁	<0.1	低	低	低	负载，电网状况，汽轮机控制	低
		二相事故	中	<10	高	中	很低		低
		三相事故	不频繁	高达100	很高	中	很低		②
	三相事故后滑极		很少	<20	高	中	中		低
4类共振激励	SSR	有保护措施	很少	<1	低/中	低	高	—	低
		无保护措施	频繁①	高达100	很高	中	高		很高
	轴频率与电扭矩脉动分量发生共振	近似共振 ↓ 完全共振	不频繁 ↓ 频繁	<0.05 ↓ 高达100	很低 ↓ 高	很 ↓ 低	低 ↓ 中	脉动振幅共振接近度阻尼	低 ↓ 高

① 如果SSR激振有可能。

② 由于最大应力的概率很低并且不常发生，总损坏危险率很低。然而，由于潜在危险率很高，必须避免这类扰动。

1）预防次同步振荡(SSR)损坏大机组。自1970年美国MOHAVE电站790MW机组两次因SSR引发大轴断裂事故后，各国对采取措施预防SSR很重视。主要措施是用滤波器消除电网中谐波频率分量，在发电机出口端加装保护装置，以增加LC振荡回路的阻尼即SSR抑制装置。产生SSR的可能性很小，如果保护措施落实得好，即使有也不危险。

2）预防发生超同步共振。超同步共振是电网三相不平衡（负序）激振与汽机叶片-叶轮系统扭振频率共振产生的，因此，减少负序和避开扭振频率是必须考虑的。

3）禁止使用三相快速重合闸。

4）允许使用快速单相重合闸。单相快速重合闸每次造成的轴的疲劳寿命损失很小，因此，单相快速重合闸是维持电力系统稳定运行的可靠措施。

5）对误同期并网次数加以限制。

6）根据电网对无功的需要应对发电机吸收无功的能力提出要求。

7）根据电网峰谷差提出对发电机调峰运行的要求。

11 发电机故障诊断

随着电子信息技术的飞速发展，从20世纪80年代初开始，各种各样的在线监测装置在透平发电机上得到了推广和应用，以往，我国发电设备长期以来实施“计划维修”缺乏针对性，容易造成设备的“过度维修”。现在，先进的工业国家都转至状态维修也就是“需修时修”。离线和在线监测是状态维修、预知维修的重要基础，状态维修的另一重要结果是要及时对设备改造（包括重绕）作出计划决策。

透平发电机是电力工业的主力设备之一，发电机运行中因各种故障酿成非计划停运，其造成的停电损失和抢修费用代价巨大。大型汽轮发电机电磁负荷大，重要部件如定、转子绕组，定子铁心的修理耗时甚多。故障诊断的目的是正确找出事故原因，找出解决问题的措施，这样就会避免同类事故的反复发生。同时从运行实践中反馈的信息是设计改进的可靠依据是提高技术水平的宝贵财富，这就是我国发电机故障诊断水平较高的原因。

11.1 在线监测

11.1.1 在线监测的配置原则

在线监测的作用是对渐变过程进行监视，以对某种设计的发电机状态进行科学预知，它不能代替突发事故时的各种瞬时记录仪。大型汽轮发电机的可靠性在出厂时制造厂已有

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

判断，运行单位只要严格按规程运行，可靠性就有保障，过多的在线监测不仅增加了投资也加重了对运行的负担。什么机组在什么时候需要装何种在线监测装置，应由发电机制造厂推荐并与运行单位磋商后决定，首先所选的在线监测装置必须质量过关，不允许产生误报和漏报。

11.1.2 直读型在线监测装置

当前国内广泛使用的有 HPA、SCW、HLM、HDM。这类在线监测获得的数据或趋势曲线可直接读到，无需专家解读，与发电机电参数（有功、无功、电压、电流等），某些非电量（温度、压力、流量、轴振等）在线监测十分相似。其中 HPA、SCW、HLM、HDM 还大量使用国外产品。这类直读型装置可信度较高，很少有漏报、误报，对水氢氢冷却发电机几乎每台都装。

HPA（氢气纯度分析仪）。一套自动测量氢气中其他气体含量的设备，有防爆要求，当氢纯度小于 95%时，可越限报警和自动补、排氢气，也可预警氢侧密封油超量、密封油过热等异常情况。

SCW（定子冷却水电导率仪）。通过测量定子冷却水的电导率，以防止定子空心铜线积垢堵塞，保持水电导率为设定值。对定子接地、树脂离子器失效、空心导线堵塞、聚四氟管闪络、水化学不良有预警作用。

HLM（氢气泄漏监测器）。在指定的可能泄漏位置进行检测，并以声、光、电形式给出预警，以避免发生氢爆。漏氢检测仪有多点，其中有一点接入定子密封水箱，当氢漏量超过规定值时，自动开启排气阀，并通过气体流量表记录排气量。由于发电机机内氢压高于定子水压，因此当定子内部水系统回路组件有问题（如空芯导线裂纹、水接头漏水等）时，HLM 就会预警。HLM 在我国很多电站及时成功地预报了定子漏水故障，从而避免了故障的发展，显示了简易可靠、不可替代的作用。

HDM（氢气露点仪）。测量机内氢气湿度并以露点表示，可以防止转子护环的应力腐蚀、冷却器漏水、氢气干燥器失效等故障。

11.1.3 解读型在线监测装置

国内正在使用的有 SEVM、RSTD、STOM、GCM、RFM 或 PDM。这类在线监测装置比较复杂且预示面广而重要，其测试结果异常特别时根据监测结果作决策时更需要专家解读。这些装置在国外不是每台发电机都装而是根据需要选用的。

SEVM（定子端部绕组振动监测器）。利用光导（高电位点）和加速度计（低电位点）监测定子端部绕组的振幅，它可以预示定子端部结构件松动、定子线棒磨损、相引线断裂等问题。以下三种情况下会考虑安装 SEVM：离线检查发现定子端部绕组有松动迹象；首台新设计、新工艺、新结构的发电机；定子端部绕组模态试验不合格的产品。

RSTD（转子匝间短路监测器）。可预示由转子匝间短路引起的转子振动、转子接地，由转子匝间短路造成的护环烧损等故障。一般 RSTD 的灵敏度很高，有轻微的匝间短路就能查到。

STOM（转轴扭振监测仪）。该设备有扭振测量、扭振保护、扭振应力分析三种主要功能。它可预报的故障类型有轴疲劳积累、次同步振荡等故障。STOM 除大型核电外，还装在特大型火电机组，主要以科研为目的。

GCM（发电机工况监测器）。GCM 主要预示定子铁心过热、定转子绝缘过热等故障。对发电机来说，过热是极为严重的故障，因此 GCM 的重要性是显而易见的。虽然国产的 GCM 几经改型，安装数量超过了数百台但解读能力较差，如遇报警，气体要送至北京分析，而且过热点也很难确定。另外，GCM 必须解决抗油雾问题，否则切除率较高。

RFM 或 PDM（无线电频率监测仪或局部放电仪）。RFM 用变压器接在中性点的可测 0kHz～30MHz（俗称窄带），主要是预示电连接断裂拉弧。PDM 中又分用电容器接在高压出线端的称为 RFCC2，用电容器接在分相封闭母线上的称为 RFCC3，在出线端定子槽内装天线的称为 SSC。PDM 可预测的故障有定子主绝缘故障、定子其他绝缘故障、电晕放电、端部手包绝缘放电、电连接断裂、绝缘老化、定子端部绕组表面放电等。SSC 除上述外，还可以预示定子槽楔松动及端部绕组松动等故障。国产 RFM 和 PDM 的安装数量也超过数百台，主要问题是排除电气干扰的措施不够得力，解读较困难，局放量 PC 与绝缘故障关系还没搞清楚，因此，远没有达到可推广应用的程度。

总之，直读型在线监测装置比较成熟，实际应用效果也较好，可作为标准配置。解读型在线监测装置质量尚待提高，在质量未过关之前也没有必要急着推广。

11.2 故障诊断

从运行中总结经验为分析故障原因找出对策为推广实施以避免同类故障重复发生，这是提高可靠性的重要一环。

从以往经验看，故障原因属设计制造方面的约占 1/2，属安装和运行的各占 1/4。属设计制造问题的应力争将问题解决在产品出厂前。

故障诊断是项很复杂的工作，需要组织有经验的专家到现场进行分析，找出故障特征、故障始发点，根据运行记录、故障记录、故障分类推测故障原因，有时需要现场试验、物理模拟、数值计算等佐证。

发电机保护只能避免事故扩大，很难避免事故绕组的产生，发电机容量越大，电磁负荷就越高，一旦定、转子烧损，定子铁心烧损，需要修复的时间较长，并且在电厂现场很难处理，停机时间长，事故损失较大。

对制造厂因设计、工艺问题而引起的群发性重大事故，应采取类似“汽车召回制”之类的应急措施，通知相关用户分期分批作好停机待修的准备，使损失控制到最小程度。历史上，TQC 系列空内冷转子绕组变形堵塞，QFN-100-2 机液压定子线棒因形状差引起线棒振动磨损，转子线圈因侧面铣槽引起过热堵塞，国产 200MW 发电机定子绕组短路，QFS 系列转子水内冷引线断裂等都属于这种群发性典型事故，其教训是深刻的。

历年来我国有关部门对发电机事故作了大量的统计工作，有按年份的事故率统计，有按容量档次分类统计，有按制造厂统计，有按发电机事故部位的分类统计，有按事故原因的分类统计。这些资料都从不同角度给出了事故与其相关因素的关系。从故障诊断视角应着力于故障模式（故障分类）分析，即异常现象→可能原因→反事故措施。表 2.3-28 为事故统计的一个示例。

11.2.1 定子故障模式分析

表 2.3-29 为定子常见故障分析（主要对水氢氢冷却的发电机）。

（1）定子内冷水系统堵塞

定子水路堵塞引起的破坏机理是堵塞→线棒过热→出槽口 R 处变形→主绝缘开裂、铜线裂纹→短路烧损。

堵塞有三种不同原因：

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 2.3-28 1993～1995 年 300MW 发电机事故与故障概况

序号	项目	故障总数	占事故总数的百分比	事故与故障的原因	事故次数
1	发电机本体	53	定子占 29%	1. 发电机定子内冷水系统问题（断水、堵塞、引水管破裂等）	29
				2. 定子绕组空心导线漏水	4
				3. 定子端部线圈存有金属异物	1
				4. 定子绕组端部松动、磨损	4
				5. 定子绕组绝缘不良	2
			转子占 6%	1. 转子绕组空心导线及绝缘引水管漏水	7
				2. 转子绕组严重匝间短路	2
			占 3.4%	其他	5
2	励磁系统	45	32.6	1. MK 断路器挂闸不好，机械断裂	4
				2. 励磁调节器元件损坏	8
				3. 转子集电环环火	4
				4. 整流柜温度高	2
				5. 主励振动大、副励定子绝缘烧损	2
				6. 主副励磁机不同心	1
				7. 失磁	14
				8. 其他	10
3	其他设备	40	28.9	因封闭母线、断路器、互感器、电缆、变压器等设备引起的机组停电	40

表 2.3-29 定子常见故障分析

机理		异常现象	查找可能原因	处理指南
机械	过热→线棒变形→短路或烧断拉弧	1. 定子槽内检温计温差超过 8℃或温度超过 90℃ 2. 定子进出水压差增加 3. 各支路水流量差 20%以上 4. 长期运行 pH 值小于 7 5. 长期水的电导率不合格 6. 断水保护动作	1. 有异物堵塞 2. 是否铜腐蚀堵塞 3. 或气堵（定子引线水流量低） 4. 查定子水泵	1. 先降负荷 2. 后反冲洗 3. 反冲洗不行，则要取出被堵线棒 4. 若铜腐蚀，就要酸洗
	漏水→短路	定子水箱内含氢量超标	1. 定子水接头焊接处泄漏 2. 定子空心导线裂纹 3. 定子绕组振幅过大接头振裂 4. 法兰连接、水接头连接松弛 5. 波纹管裂纹	1. 打水压或气密试验找出漏点补焊 2. 若与振动大有关应减振
	绝缘磨损或断线→短路	1. 定子绕组振幅超标导致绝缘磨损 2. 电接头振断拉弧烧损	1. 定子端部绕组椭圆形固有振动频率不合格引起共振 2. 绕组固定不好	1. 做模态试验采取措施改变频率降低振幅 2. 加固
	铁心松动→噪声大→铁心短路	1. 铁心有异常噪声 2. 进风温度与噪声大小有关 3. 端部断齿	1. 铁心松动特别是定子两端铁心 2. 某些结构铁心夹紧环松	1. 重新压紧铁心 2. 做铁心发热试验消除热点
	机座共振	机座噪声大 振动与转速有关	机座共振	1. 改变机座固有振动频率 2. 调整压紧定子底脚垫片
电气	局部放电→严重烧损	有表面放电痕迹明显通道 耐压试验时放电严重	1. 手包绝缘处质量不合格 2. 定子端部受潮或出厂固化不好 3. 线棒端部防晕处理有问题 4. 机内氢气湿度超标	找正原因对症下药
	电蚀虫效应→短路	异物钻透主绝缘	槽部或绕组端部有铁磁物质	加强清洁度

1）异物堵塞。如定子水路中法兰橡皮垫龟裂、焊料、过滤网破裂、水接头铜垫圈等，这些都是制造或运行过程中误入的。

2）由定子铜线氧化积垢而引起的堵塞，主要是水质问题。GB/T 7064 中对贫氧水系统有水电导率为 0.5～2.0μS/cm的要求，它通过旁路 5%的水流过离子树脂处理装置来实现。要求 pH（25℃）为 8.0～9.0，它通过加碱装置来实现，如图 2.3-45 所示，pH 值对氧化铜生成是至关重要的。另外，水中含铜量要小于或等于 20.0mg/L，这三项规定都是防氧化铜积垢的措施。当然能以不锈钢管代铜更好，是比较彻底的解决办法。

3）由气堵发生的过热和烧损事故已在大机组上多次发

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

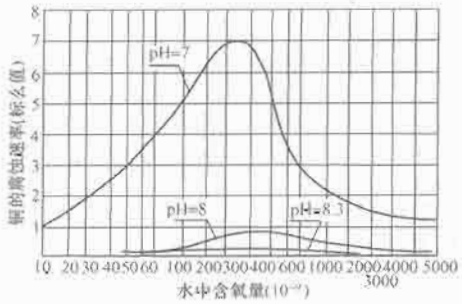


图 2.3-45 铜管的平均腐蚀率

生，有的甚至整台定子线圈需在工地重绕，修复工期长达数月。

气堵主要特点是，新机带满负荷几百小时内在励端最长环形引线最高处烧毁。以 600MW 发电机为例，可将外直径 45mm/内直径 19mm 粗的引线烧掉数百毫米之多，过烧的范围和程度与定子接地保护动作时间长短有关，气堵与定子线棒水路结构有关。以国产优化型 600MW 汽轮发电机为例：该发电机定子为 42 槽，上下层各 42 根线棒，从励端汇流管经 84 根定子绝缘引水管分别向定子上、下层定子线棒供水后再流入汽端汇流管从顶部导出。另一路从励端汇流管流经 12 根环形引线后并成 6 路再与主引线、出线瓷套管内导电杆（对于 3 个中性点瓷瓶还经过中性点母线板）串联，最后通过 6 根绝缘引水管流入出线盒内的小汇水管，励端小汇水管通过机外的外接管再将水流到汽端汇流管从上面导出，如图 2.3-46 所示。

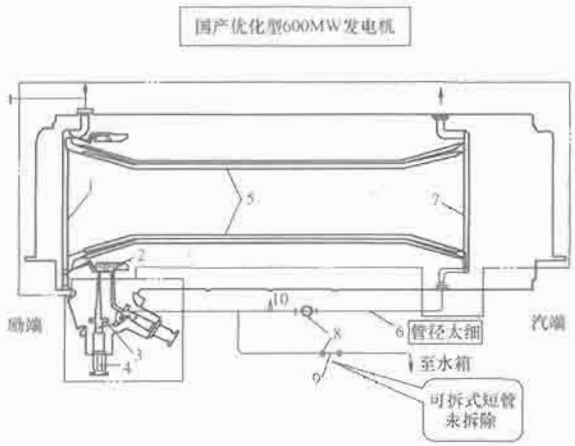


图 2.3-46 定子绕组水路示意图

1—励端汇流管；2—环形引线；3—小汇流管；4—瓷套管内导电杆；5—定子线棒；6—外接管；7—汽端汇流管；8—流量计；9—可拆式短管；10—跑风阀

定子线棒、定子引线的进水压头是相同的，电流密度也采取相接近的值，所选流道截面使线棒和引线的温升相接近。虽然长短引线并联，但各环形引线的流量根据实测相差不超过 10%在允许的范围内，因此，在水路正常时，环形引线的水温不会超过 20K，运行是安全的。

从多次事故分析中发现，气堵是引起环形引线过热的元凶，发生气堵的原因如下：

①图 2.3-46 中可拆式短管未拆除。为将定子线棒、引线和绝缘引水管中的剩水放尽并彻底吹干，因此有必要设置一段可拆式短管供定子绕组水路排水和吹干用，机组投运前必须将此段管道拆除，否则它会使出线盒小汇流管流量减少。另一方面停机停泵后会使空气进入，容易在长引线的顶部积聚空气堵塞水路，某电厂 1 台 740MW 发电机因此出了事故。

②外接水管管径必须按原设计配置。有些电厂不了解外接管的作用将 $\phi45\times2.5$（DN40）外接管接成 $\phi25\times2.5$（DN20）至使各引线的水流量大为减少影响冷却效果，另一方面流量减少不能将水中的气体带走，更易形成气堵过热烧毁。表 2.3-30 为某电厂两种不同外接管管径时引线水流量的变化。

修复前（外接管 DN20）线棒出水平均温度比出线出水平均温度低 6.4℃。修复后（外接管改为 DN40）线棒出水平均温度比出线出水平均温度高 3℃。按设计规定，正常时线棒出水平均温度应该比出线出水温度高。

③小汇流管这股水路排气困难是造成气堵的另一个原因。某电厂一台 740MW 发电机大修中对定子水系统进行了反冲洗，总的水流量增加了 5%，但小汇流管这一路水流量反比大修前减少约 10%，初步分析认为这一水路存在着气堵现象，后将小汇流管出水流量计处管道拆开排气，使流量从 150L/min 提高到 194L/min，因此停机、停泵后初次通水就应十分注意小汇流水路的排气问题。

预防引线气堵的主要措施是：

①在外接管上装一个流量计，监视小汇流管这路水的流量是否正常，如图 2.3-46 所示项 8。

②在外接管上装一外跑风阀，在起机作排空之用，见项 10。

③外接管内径要严格按图配置。

④运行前要将项 9 拆除，并检查反冲洗阀是否关闭。

以上三个原因所造成的堵塞都不是突然发生的而是渐进的过程。因此，一旦发现定子槽内检温计超标并排除了检温计误报的可能性以后，首先采取的措施就是降负荷待适时停机反冲洗或作其他处理。

由水泵或水箱液面波动引起的断水，断水保护装置会按图 2.3-47 所示的程序报警或跳闸。

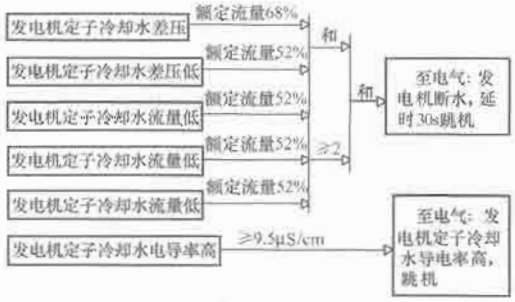


图 2.3-47 发电机断水保护逻辑图

表 2.3-30 用超声波流量计测试出线部流量

1）小汇流管外接 $\phi25\times2.5$ 管的流量记录（水压 0.36MPa）	
引线编号	流量（L/min）
W1	17.05
W2	20.15
V1	18.81
V2	18.25
U1	17.86
U2	17.18
$\phi25\times2.5$ 管流量	98.6

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

2）小汇流管外接φ45×2.5管流量记录（水压0.31MPa）	
引线编号	流量（L/min）
W1	26.58
W2	29.21
V1	28.01
V2	27.42
U1	31.16
4	28.37
φ45×2.5管流量	189.2

（2）泄漏

泄漏是定子内冷水系统另一种常见的故障。

定子线棒渗漏水分为静态与动态两种。静态指定子水接头把合密封不严，焊缝质量不好，空心铜线有缺陷，定子绝缘引水管有伤等。发电机在进行密封性试验时，就可以发现这种静态渗漏而加以修补。动态泄漏指发电机运行后有的甚至运行相当长时间后由于动应力、热应力或水冲蚀而造成的渗漏水。200～300MW发电机定子空心导线单独抽出、水接头焊接面积较小、补焊成功率较高，而600MW及以上的机组采用如图2.3-26所示的水电接头，万一焊缝处漏水就很难补焊，只能更换线棒，工作量就很大。

在氢、水冷却发电机中因氢压高于水压，定子水箱中含氢量增加就是漏水的信号，微量渗漏使线棒潮湿发热到一定程度就会发生线棒对地或相间突然短路。

运行中若定子水箱内含氢量（体积分数）超过10%或漏氢量大于5N·m³/d时，应立即停机处理，很多台发电机由此避免了故障的扩大和事故的发生。过去制造厂内用水压试验检查水路的严密性，由于它的灵敏度不够，现已被气密试验代替。另外制造厂内不通水对定子运输时防止线棒内积水而造成绝缘冻裂也是很有益的。

（3）绕组振幅过大

结构弱点→定子绕组振幅过大→绝缘磨损或水接头泄漏或电连接疲劳断裂→突然短路。

所谓结构上有弱点包括：定子绕组固定不良，端部绕组固有振动频率不合格等。

定子绕组端部由压板、绑扎、支架、线棒、压环等零件组成。刚度、材质均不相同，是一个非匀质系统，要计算它的固有振动频率很困难。JB/T20140《透平型发电机定子绕组端部动态特性测试方法及评定》规定了定子绕组冷态整体椭圆形固有振动频率应避开94～115Hz即热态避开激振频率±10%，由于工艺分散性大，该项已列为检查项目。定子绕组通水（热态65℃）测得的固有振频比冷态（室温）绑扎结构约下降5～8Hz，压板结构下降1～2Hz。端部引线的固有振频也应避开94～115Hz，试验采用锤击法进行。在型式试验时在定子绕组端部装振动传感器以测量端部振幅。新机的测试值应小于或等于100μm。在线监测时振幅（峰-峰值）大于或等于250μm，应报警减负荷；振幅（峰-峰值）大于或等于400μm，应立即停机。

由于定子绕组端部大量绝缘件会受热收缩，而且绕组在寿命期内会受到来自系统扰动的各种冲击，因此，大机组的定子端部绕组要有重新紧固的可能性。

在处理定子端部绕组松动问题上不分析原因，盲目加固是无用的，在处理定子绕组松动的同时，对定子铁心也要仔细检查，必要时首先要解决铁心松动问题。

（4）常见的定子铁心故障

有片间绝缘损坏、有效铁心变松、铁心端部压指偏、绕组两点接地引起定子铁心损坏等几种情况。定子铁心用厚度为0.35～0.5mm的扇形硅钢片叠成，每片有漆膜绝缘。冲片叠装在鸽尾筋上，通过鸽尾筋本身彼此连接，如果铁心硅钢片绝缘损坏，就形成了闭合回路，该电流产生的损耗能达到很大的数值，引起很高的温度甚至会使铁心熔化。铁心松动、叠片振动是冲片绝缘损坏的主要原因。有效铁心松动的主要特征是靠通风道硅钢片齿部弹开，使通风道“闭眼睛”，硅钢片由于接触腐蚀引起锈斑，铁心电磁噪声增加。定子边段铁心已松动断裂的硅钢片会刺破定子线棒绝缘引起短路击穿造成事故停机，及时地检出定子冲片绝缘损坏是提高发电机运行可靠性的主要措施之一。发电机在交接试验、局部或全部更换定子绕组前后及发现定子铁心有缺陷时，应该进行铁损耗试验。按相关标准规定，定子铁心损耗发热试验时应该在1.4T进行，历时大于45min。相同部位铁心温差小于或等于15K，铁心最大温升小于或等于25K为合格。加热分段加压、端部铁心阶梯形段黏接、保证通风槽钢质量，减少硅钢片漆膜收缩率、减小冲片毛刺是制造厂提高铁心装压质量的主要措施。

当发电机出现一点接地时，如果电容电流和持续时间超过一定数值，就可能引起定子铁心烧损，大机组接地电流允许值已减至1A。定子一点接地要求保护，自动跳闸，否则发展到两点接地就会烧损定子铁心。

（5）局部放电

大机组定子额定电压高，定子端部电场形状复杂，容易产生局部放电，结果使绝缘碳化逐步导致短路击穿事故。

手包绝缘不良，手包绝缘与模压主绝缘搭接处脱节，加之机内氢气湿度大或适形垫条固化不好，就易引起局部放电。另外，线棒端部防晕处理不好，电场过分集中，整机起晕电压低，也易从电晕放电发展成局部放电。控制和测试手包绝缘直流泄漏电流，20kV相间小于或等于8mA，非相间小于或等于12mA，以确保手包绝缘质量。

DL/T651规定氢冷电机在氢压下运行的氢气允许湿度露点应为$-25℃\leqslant t_d\leqslant 0℃$，补氢用的新鲜氢气常压下的允许湿度$t_d\leqslant -50℃$，要做到这一点对定子绕组水内冷发电机应在定子水箱内装设加温装置，停机时继续保持定子冷却水循环，必要时可配置有单独循环风机的氢气干燥器以在发电机停机时仍能运行。机内氢气湿度与密封油中含水量有关，密封油中水含量的合格标准是不产生游离水，如图2.3-48所示，它是油温和氢气湿度的函数。

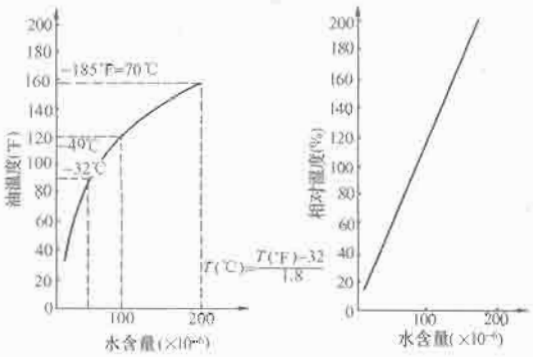


图2.3-48 不产生游离水时油中含水量

定子单个线棒应在1.5额定线电压下不起晕，在1.0额定线电压下，定子绕组端部应无明显的晕带和连续金黄色亮点，这是避免端部局部放电的有效措施。

（6）金属异物引起故障

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

特征是：异物一般在定子两侧端部渐开线处且多在两侧顶部12时和下部6时位置附近；金属异物引起的故障有突发性，由于金属异物窝藏的位置一般离定子铁心或机座有一定距离，往往接地保护还未动作，而差动保护却已动作；当金属异物尚有残留时，用磁铁尚能吸出。机内遗留金属异物的运行时间取决于异物体积的大小，一般无法超过大修间隔期。除加强管理外，投运一年后作第一次大修时，应把检查端部紧固件是否松动、脱落，端部硅钢片有无断裂作为重点。

11.2.2 转子故障模式分析

表2.3-31列出了发电机转子的常见故障分析。

表2.3-31 转子常见故障分析

机理现象		异常现象	查找可能原因	处理指南
机械	转子弯曲振动	冷态超标	1. 不平衡 2. 转子零部件有松动 3. 轴颈不圆度超标 4. 对中有问题 5. 支撑刚度不够 6. 太靠近共振区（临界转速）	振动原因比较复杂，首先要确认是否发电机本身问题，其次要搞清楚冷态与热态是否有别，然后按不同原因对症下药
		冷态合格、热态超标	1. 匝间短路或两点接地 2. 通风道有堵塞热不平衡 3. 动静碰撞如密封瓦 4. 轴承标高有变化	
	应力腐蚀	护环上有裂纹	1. 材料对应力腐蚀较敏感 2. 相对湿度大于50% 3. R偏小，应力集中大	1. 按标准控制机内氢气湿度（包括停机时） 2. 空冷发电机停机时要开加热器
	疲劳断裂	零部件断裂后飞逸（如槽楔、极间引线等）	1. 低周疲劳 2. 应力过大特别是应力集中	1. 降低应力集中 2. 提高材料抗疲劳性能 3. 采用弹性结构
电气	滑动接触火花	集电环环火 ↓ 烧损刷握、集电环	1. 炭粉积累 2. 电刷导流不均匀 3. 集电环与电刷表面接触不好	1. 合理选择集电环及电刷材料 2. 适当减小集电环直径 3. 加强集电环通风
	负序超标	护环、槽楔、转子月牙槽处表面烧伤，严重时烧熔	1. 非全相合闸或跳闸 2. 异步起动	1. 烧伤处要打磨、探伤，以免后患 2. 大机组发电机出口加开关
	匝间短路	转子绕组匝间短路引起励磁电流增加，磁场波形畸变	1. 异物侵入 2. 铜线有毛刺 3. 匝间绝缘缺陷 4. 铜线磨蚀产生铜粉	1. 提高下线工艺质量 2. 对盘车时间长的机组（如两班制调峰）要加防范措施
	接地	转子绕组绝缘电阻减小	1. 转子绕组过热 2. 金属异物侵入 3. 炭粉积累	将不稳定接地烧穿至稳定接地，然后寻找接地点

（1）转子横向弯曲振动

转轴振动的原因很复杂，可分为机械及电气两个方面。机械方面原因在冷态就能发现，电气方面原因在热态出现更多。

1）机械原因。质量不平衡，机组找正不准，联轴器瓢偏，轴承支撑系统刚度不够，支撑件与转频共振等。

2）电气原因。如定、转子气隙不均匀，转子绕组匝间短路或两点接地，发电机三相负荷不对称，内冷转子冷却通道局部堵塞等。

分析机组振动原因时，振动频率是十分重要特征，例如：

1）转子质量不平衡，其振动频率与回转频率一致且与负荷无关。

2）转子偏心或联轴器瓢偏或d、q轴刚度不对称，其振动频率含有两倍工频成分。

3）转子动静摩擦，振频中有两倍以上成分且振幅不稳定。

4）发电机三相负荷不对称或定子不对称短路时，振频含有两倍工频成分。

振动状态是衡量发电机可靠运行的重要指标，振动异常或加剧往往是机组发生事故的前兆。

在制造厂，转子在额定转速下单独运转考核振动。在现场，机组成轴系在空载和额定状态或按图2.3-2所示负荷下考核振动。测量振动有测轴承座和测轴振两种方法，测量方法和要求见GB 11348。功率50MW及以上的机组要求同时测量轴承座振动和轴振动，而且都需要满足标准要求。表2.3-32所示为轴承座振动限值，表2.3-33为轴振动相对位移限值，表2.3-34所示为轴振绝对位移限值，轴振考核可以按表2.3-33或表2.3-34所示。新机出厂时振动试验值应在A范围内。升降速、过临界转速或超速时的振动不得超

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

过C范围。轴向无止推轴承时，不考核轴的轴向振动。稳态运行时，假如轴承座或轴振振动值变化显著，即越过B值的25%，无论是增加或减小，一定要报警并采取措施查明变化的原因，必要时根据振幅作出是否停机的决定。

表 2.3-32 轴承座振动限值（速度） 单位：mm/s

范围	转速（r/min）	
	1500或1800	3000或3600
A	2.8	3.8
B	5.3	7.5
C	8.5	11.8

表 2.3-33 轴振相对位移限值（峰-峰值） 单位：μm

范围	转速（r/min）			
	1500	1800	3000	3600
A	100	90	80	75
B	200	185	165	150
C	320	290	260	240

表 2.3-34 轴振绝对位移限值（峰-峰值） 单位：μm

范围	转速（r/min）			
	1500	1800	3000	3600
A	120	110	100	90
B	240	220	200	180
C	385	350	320	290

注 范围A：振动数值在此范围内的设备可认为是良好的并可不加限制地运行。

范围B：振动数值在此范围内的设备可以接受作长期运行。

范围C：振动数值落入此范围内，开始报警，提请注意安排维修。一般该机器还可以运行一段时间直到有合适机会进行检修为止。

振动数值超出C时，就瞬时跳闸。

（2）护环应力腐蚀

国内曾发生过30多起护环应力腐蚀产生裂纹，所幸的是发现及时才幸免飞逸之灾。主要原因是以往200MW及以下所用护环材料（如50MnCr72，50Mn18Cr4，50Mn18Cr4WN等）抗应力腐蚀（SCC）性能差，在潮湿环境中易产生应力腐蚀裂纹。现在新机组均已采用不易产生应力腐蚀的18Mn18Cr材料，使问题得到彻底解决，图2.3-49显示了50Mn18Cr4裂缝扩展速率与相对湿度的关系。对已运行的50Mn18Cr4护环，要全部用18Mn18Cr护环来替代暂时还不易做到，在结合运行条件首先解决机内湿度的问题，使露点在0℃以下（相对湿度小于或等于40%）。结合定期检修进行仔细普查，如有问题应根据裂纹情况酌情处理。例如，SSC易发生在护环热套表面R处应力集中部位，如果裂纹较浅，可将其打磨掉。特别应注意防止发电机停机时的冷凝结露。维修时将转子置于机外或长期存放转子时，要进行湿度监控，避免转子受潮。

（3）转子接地

虽然转子一点接地尚可运行，但比较危险，万一发生另一点接地就容易使大轴烧损，也会导致转子本体严重磁化，剧烈振动。

造成接地故障原因有转子绕组过热导致绝缘受损或金属异物侵入或集电环处炭粉堆积。

一般认为绝缘电阻低于2kΩ为非金属性接地，而低于500Ω则为金属性接地。稳定性接地绝缘电阻不随转速、温度而变化。不稳定性接地分为高转速接地和低转速接地。绝缘电阻随转速升高而降低，这时故障点多发生在槽内或端部绕组的顶部；低转速接地时故障部位多在转子槽底，随温度（负荷）变化的接地故障点有可能在转子绕组的两端。首先将不稳定接地处烧穿，一种结果是烧成稳定接地，另一种结果是可能将接地点消除。转子绕组稳定性接地后，就可很容易地测得接地点。

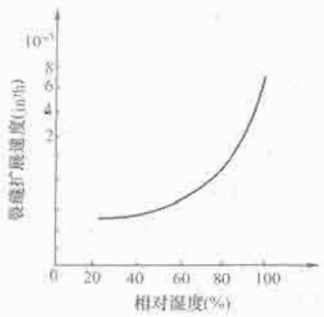


图 2.3-49 裂纹扩展速率与相对湿度的关系

（1m/h=7.055×10⁻⁴m/s）

（4）匝间短路

转子匝间短路是比较常见的故障，严重的匝间短路不仅影响发电机无功出力，引起机组振动而且导致轴电压升高。当励端轴承绝缘有问题时会烧伤轴瓦，有时顶匝匝间短路还会烧伤护环。匝间短路又比较容易发展成转子绝缘接地而使事故扩大。由于当前火电参与调峰的机组日益增多，因此匝间短路故障有增多的趋势。造成匝间短路的原因在制造方面是铜导线加工中倒角与去毛刺不严，端部拐角匝间绝缘垫片垫偏或漏垫，导线焊口清理不干净，转子加工时金属屑的侵入等。在运行方面，铜铁温差过大，铜线蠕变形成残余变形，多种原因导致的内冷转子绕组堵塞局部过热使匝间绝缘烧损，两班制运行的发电机，转子长期盘车运行，转子挠度使转子铜线磨蚀出现铜粉而酿成匝间短路。

检测静态匝间短路有直流电阻法、开口变压器法，动态检测匝间短路有交流阻抗法和波形法。由于转子槽楔松紧不一样，交流阻抗法主要是观察阻抗是否有突变而不是去注意变化的幅值。波形法又称微分动测法，它的基本原理是将运行中的气隙中的旋转磁场进行微分，根据微分后的波形分析诊断转子绕组是否存在匝间短路故障，并准确显示故障槽的位置，三相稳态短路试验及$\cos\varphi=0$时的运行状态最适于这种测试方法，该方法灵敏度较高，适合于在线检测。

（5）负序超标

在正常运行条件下，发电机的三相负荷基本上是对称的。长时间的不对称运行，主要指长时间负荷不对称和输电线路阻抗不对称的运行状态。短时间的不对称运行，主要指电力系统或发电机不对称故障，包括单相接地、两相短路及单相重合闸以及断路器的非全相操作。

表2.3-16为GB755电机定额和性能所规定的发电机不平衡负载运行限值，结构设计、材料选用要满足这些要求。

发电机在盘车状态或低速运转时，主开关误动使发电机异步起动，转差率很大导致转子严重烧损，也曾经发生过，这和负序超标有些差别。图2.3-39所示显示了透平发电机转子表面负序电流的路径，当负序超标时这些部位的损耗很大，由此引起局部过热严重烧伤，甚至有烧熔、裂纹等现象。如何防止高压断路器的非全相运行，至今为尚未完全解决的难题，一旦断路器非全相运行，运行人员应查明是继电保护原因，还是断路器操作机构本身原因，判别是电气回路

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

元件的故障还是机械性能的故障，赴现场检查断路器三相的确切位置进行操作。

（6）集电环和电刷装置烧损

大型汽轮发电机只要不采用无刷励磁就得采用集电环电刷装置传递电流，因而它对发电机可靠运行有十分重要的影响。集电环与电刷之间发现火花是两者在滑动接触导流过程中失去正常运行条件的征兆。消除和抵制火花主要措施为：

1）减小集电环直径，从 ϕ455mm 降至 ϕ380mm，一方面是减少机械摩擦损耗，另一方面也降低了电刷运行的线速度，改善了运行条件。

2）刷握设计、炭刷选用要保持并联运行的电刷上通过的电流分布均匀，要经常检查和调整每个电刷上的负载电流。

3）集电环表面开沟有利于消除电刷与集电环滑动接触中出现的气垫现象，并加强集电环装置的通风。

11.2.3 发电机辅助系统常见故障分析

表 2.3-35 为辅助系统常见故障分析。发电机辅助系统包括冷却器系统，定子冷却水系统、氢气系统、密封油系统，励磁系统。由于断水、内冷水电导率不合格、pH 值不合格已在定子故障中叙述，所以不再重复。

表 2.3-35 发电机辅助系统常见故障分析

各种系统	异常现象	查找可能原因	处理指南
冷却器系统	1. 放水阀排出水 冷却器水内含氢	1. 漏水	1. 确定漏水水管后将两端堵死
	2. 冷水与冷风温差加大 冷却器进出水温差减少或加大	2. 结垢或堵塞	2. 检查过滤网、钢丝刷冷却管或酸洗管子
	3. 冷却器结露	3. 进水温度太低	3. 提高进水水温
氢气系统	1. 漏氢量超标	1. 各静止接合面漏氢，转子导电螺钉漏氢，氢管路截面不严，内冷水系统漏水，平衡阀精度差或瓦间隙太大	1. 分部打压找漏消缺
	2. 氢爆	2. 机内局部氢气纯度不合格，发电机漏氢至回油箱，封母……周围有明火	2. 控制机内氢气纯度，在线监测漏氢处，发电机周围严禁明火
	3. 氢气纯度超标	3. 平衡阀精度不够（双流环）、进油温度过高	3. 消除左边可能原因
	4. 氢气湿度超标	4. 油中含水量太大，氢气干燥器去湿能力不够	4. 改进汽封，密封油空侧加真空净油装置，改进氢气干燥器
油系统	向机内漏油	1. 回油不畅	1. 加大回油腔容积
		2. 平衡阀、压差阀，油封箱补排油阀精度不够	2. 使油质达标，防止间隙磨大和两阀卡死
		3. 瓦间隙磨大	3. 采用接触式浮动油挡
		4. 油挡失效	
励磁系统	1. 无刷励磁系统整流元件损坏（短路或开路）	1. 系统干扰大，元件反向电压不够，整流轮内漏油	1. 提高元件反向电压，保持整流轮内清洁
	2. 静态励磁系统灭磁开关拒动，整流元件损坏失磁	2. 制造质量问题或误操作	2. 提高制造质量加强运行人员培训

（1）漏氢量超标

发电机漏氢量超标是较普遍遇到的问题。消耗氢气过多、补氢量大不但浪费资金而且也是运行中的一种不安全因素。

发电机的漏氢途径有外漏和内漏两种。发电机内氢气通过泄漏点漏到机壳外称为外漏。外漏部位常发生在端盖和机座结合面、上下半端盖结合面、端盖与密封座结合面、定子引出线瓷套管、氢气冷却器上下法兰与机座结合面、局部焊缝、出线盒与机座结合面、转子集电环导电螺钉或转轴中心孔堵板、氢管路截门等。发电机制造厂内采用分部找漏即主要零部件、主要装配都要充额定氢压的压缩空气找漏，达标后才能转入下工序。电厂装配后粗找漏点用涂肥皂水法，精找时充卤素用卤素检测仪找，找到漏点逐个消除直到合格为止。内漏指平衡阀精度不够，氢、空两侧大量窜油而造成的漏氢或因氢压高于水压使氢气漏入定子内冷水箱或冷却器的冷却水中。发电机运行中使用漏氢监测仪进行在线监测，通常在定子水箱、冷却器水箱、A、B、C 三相封闭母线、密封座、空侧回油箱内装传感器。当轴承主油箱、封闭母线外套内氢气体积含量超过 1%时应停机找漏。

（2）防止氢爆

只有氢气占空气中体积含量的 4%～75%，且有明火时氢气才会爆炸，只要采取可靠的技术措施和加强管理，氢爆是完全可以避免的。GB/T7064 按照 IEC34-3 在附录 D 里详细规定了氢冷透平型同步电机的安全措施，它的主要要点是：

1）正常运行时氢气的体积纯度不能低于 95%，在纯度降至 85%之前，应停机并将氢气置换，至少应有两个独立的氢气纯度测量系统。

2）氢气与空气不能直接置换，反之亦然。

3）确保密封油的可靠供应。

4）在发电机和它的辅机周围应禁止明火作业、焊接、吸烟或其他点火手段。

5）氢、油系统承压元器件均应经过 0.8MPa（表压）水压试验，不能用脆性和多孔材料制造承压器件。

6）内装电气有防爆功能，可按 IEC60079 选用安全型。

7）在氢气易积累的地方，包括发电机厂房内应有合适通风。

8）发电机每 24h 的绝对漏氢量不允许超过 18m³NTP。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

(3) 解决漏油的措施

漏油是氢冷电机的常见病，漏油问题之所以难解决，因为它带有普遍性、分散性和顽固性。发电机进油的危害性从定性到定量逐渐被深化认识，密封油在高速旋转及排泄过程中，与机内氢气相接触将油中水分释放是患害之源。

1) 如图 2.3-49 所示，机内因漏油使氢气相对湿度超过40%时，对 18Mn5Cr 护环钢的裂缝扩展速率会突然加快。

2) 漏油使氢气纯度下降，从而引起风摩损耗增加。

3) 漏油会显著降低氢气的介电性能，降低绝缘介电性能。

4) 油雾进入机内风道如定子铁心通风道、转子内冷风道，会影响表面散热效果。

5) 漏油使很多在线监测装置中的传感器失效，使在线监测无法工作。

漏油分为稳态和暂态两种情况：稳态漏油是指发电机在正常运行中始终可以从排污阀中放出油来，但一般数量不大。暂态漏油是指正常运行时不漏油经过起动、停机或振动有变化后才出现的漏油现象。由于国内都采用如图 2.3-15 (a) 所示的压入式通风系统，油挡间隙超标和风扇抽力造成的负压是造成稳态漏油的主要原因。大气压下的空气比同压力的氢气密度大 10 倍，因此风扇抽力就大 10 倍，由此可见空冷下的漏油最严重。密封瓦内油挡与转轴的直径间隙设计值是 0.4～0.5mm，油挡为黄铜梳片结构，转子起停超过临界转速时，振幅增大黄铜梳片油挡很容易被磨损，并失去挡油功能。20 世纪 90 年代中期开发的 TN 系列直接接触式油挡创造性解决了这个难题。该油挡分块组合成整圆，利用自润滑材料靠弹簧直接压在轴上与轴一起浮动且无间隙，油挡与轴既直接接触，自身磨损量小又不磨轴产生振动，从而有效地解决了因油挡间隙过大产生的漏油问题。

三阀质量差，油系统运行不稳定是引发暂态漏油的主要原因。双流环式油密封中平衡阀、压差阀、油封箱补排油阀都为自动控制阀，统称三阀。以往国内制造厂生产的 100MW、200MW 汽轮发电机三阀质量达不到要求，造成油系统运行不稳定而暂态漏油。20 世纪 80 年代从美 WH 引进了 300MW、600MW 技术使三阀质量得到控制。现在压差阀的精度为 (0.084±0.01) MPa，平衡阀精度提高到±500Pa，用不锈钢球阀或波纹管代替油封箱补排油电磁阀，使油封箱液面高度保持在(20±10)mm 范围内。

密封瓦磨损、间隙增大是引起暂态漏油的另一个因素。密封瓦磨损曾因下列几种情况而发生：

1) 油质脏，使间隙磨大。油质应符合 DL/T 705—1999 要求。

2) 密封瓦钨金面因椭圆形热变形产生动静摩擦而将瓦磨损。

3) 密封瓦两侧面推力不平衡使密封瓦卡死，引起轴不规则振动而将瓦磨损。

4) 密封座与端盖把合面应与轴系扬度相配车以免密封瓦卡死。氢侧回油由于高油温和转轴高速旋转呈现大量泡沫，因此氢侧回油结构中应设有消泡箱，免得因氢侧回油不畅而引起漏油。

11.3 提高可靠性对策

1) 认真执行有关标准。为提高发电机运行可靠性，制造与运行两方面专家携手合作，在分析故障原因基础上已将反事故措施规定在有关标准之中。特别要注意标准中的限值及测试方法，这些都是大量实践经验和大量科技成果的浓缩，必须很好地理解和遵守。

2) 在国内标准中采纳 IEC 标准内容和 CIGRE 各种导则是吸收国际经验的好方法，宣贯国内外标准是提高制造质量和运行、维护水平的有力措施。

3) 有计划地用新技术去改造老机组。有些发电机运行年头较长，某些隐藏的缺陷容易发展成事故，因此，使用部门应有计划地与制造厂合作，用最新的结构、工艺、材料去更新改造这些老机组。事实证明，更新改造可确保老机组运行可靠性，延长发电机的使用寿命，投资较少收效却很明显。

4) 逐步推行状态检修，规范地配置在线监测装置，对每台大型发电机应建立寿命管理的数据库，才能将一般规律与每台发电机的具体情况相结合，才能有的放矢，提高每台发电机的运行可靠性。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第4章 水轮发电机

1 分类及型号

1.1 分类

1.1.1 常规水轮发电机

1）水轮发电机由水轮机驱动。它的安装结构型式通常由水轮机的转轮型式确定。冲击式水轮机驱动的水轮发电机多采用卧式结构，如图 2.4-1 所示；混流式或轴流式驱动的大、中容量水轮发电机多采用立式结构（悬式或半伞式），如图 2.4-2 和图 2.4-3 所示；贯流式水轮机驱动的灯泡式水轮发电机的结构如图 2.4-4 所示；抽水蓄能电站的发电电动机，通常由混流式或斜流式水泵水轮机驱动，均采用立式结构，如图 2.4-5 和图 2.4-6 所示。

2）由于水电站的自然条件和工作状况各异，水轮发电机组的容量和转速变化范围很大。按尺寸大小和结构特征，可大致按表 2.4-1 划分其容量和转速等级。

3）小容量水轮发电机可单机独立供电，也可多机并联自成电网供电；大中容量水轮发电机则和大电网连接。由于水轮发电机组起动快，开、停机迅速，运行调度较灵活，因而在电力系统中，除了担负基荷外，还常用作调峰、调相运行或作为事故备用电源。

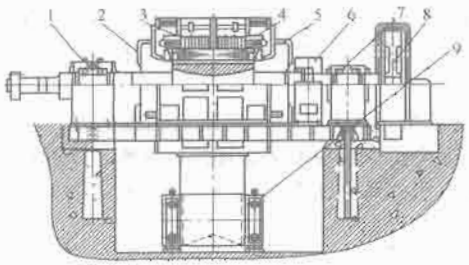


图 2.4-1 卧式水轮发电机（P_N=6MW，n_N=600r/min）

1—径向、推力轴承；2—后端盖；3—定子；4—转子；5—前端盖；6—集电装置；7—径向轴承；8—辅助飞轮；9—空气冷却器

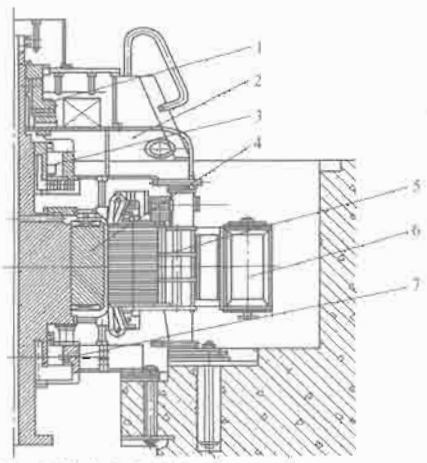


图 2.4-2 悬式水轮发电机（P_N=16MW，n_N=1000r/min）

1—推力轴承；2—上机架；3—上导轴承；4—转子；5—定子；6—空气冷却器；7—下导轴承

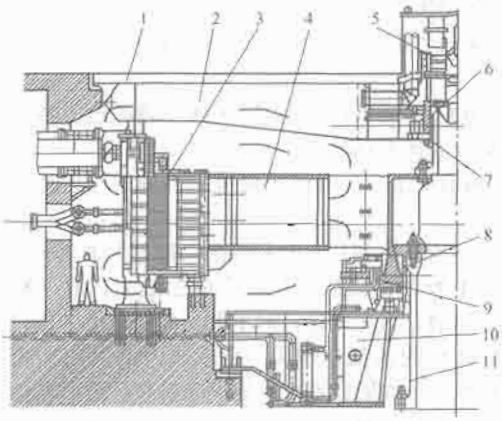


图 2.4-3 半伞式水轮发电机（P_N=700MW，n_N=75r/min）

1—上盖板；2—上机架；3—定子；4—转子；5—集电装置；6—上导轴承；7—上端轴；8—推力轴承；9—下导轴承；10—下机架；11—主轴

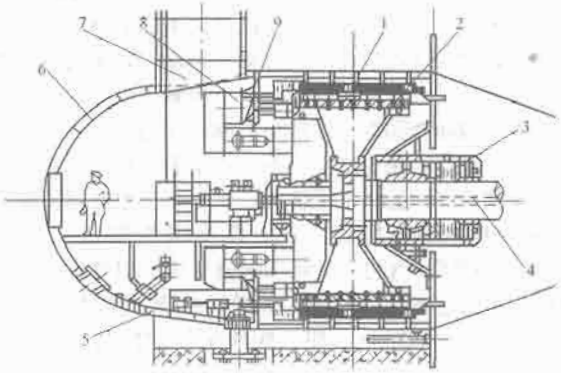


图 2.4-4 灯泡贯流式水轮发电机（P_N=38MW，n_N=107.1r/min）

1—定子；2—转子；3—组合轴承；4—轴；5—冷却套；6—泡头；7—竖井；8—空气冷却器；9—轴流风机

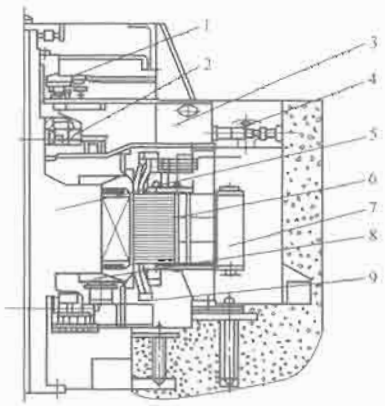


图 2.4-5 悬式发电电动机（P_N=60MW，n_N=750r/min）

1—推力轴承；2—上导轴承；3—上机架；4—推力外循环油冷却器；5—转子；6—定子；7—空气冷却器；8—风扇；9—下导轴承及下机架

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

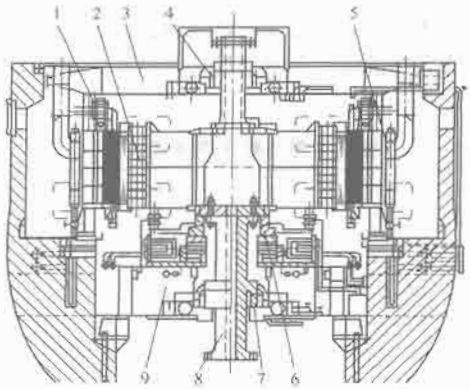


图 2.4-6 半伞式发电电动机(P_N=150MW,n_N=200r/min)
1—定子；2—转子；3—上机架；4—上导轴承；5—空气冷却器；6—推力轴承；7—下导轴承；8—主轴；9—下机架

表 2.4-1 容量和转速划分范围

分类	额定功率(kW)	额定转速(r/min)		
		低速	中速	高速
小容量水轮发电机	<500	<375	375～600	750～1500
中容量水轮发电机	500～10000	<375	375～600	750～1500
大容量水轮发电机	>10000	<100	100～375	>375

4）水轮发电机与其他类型发电机相比，具有下列主要特点：

①要求水轮发电机具有较大的转动惯量。

②通常，水电站离负荷中心较远，输电线路较长，电网对水轮发电机有较高的静态和动态稳定性要求。

③虽然水轮发电机达到飞逸转速的可能性极小，但在结构设计时仍需考虑转动部件的机械强度在这一转速时具有必要的可靠性。

④水轮发电机通常是单台设计，小批量生产。

1.1.2 灯泡式水轮发电机

1）我国低水头水力资源丰富，适于建设中、小型水电站。对于这些水电站，采用贯流式水轮发电机组具有明显优势。根据水轮机与发电机连接和传动方式不同，贯流式机组又分为半贯流式和全贯流式两大类，以半贯流式发展最快。半贯流式机组从结构上分为灯泡式、轴伸式和竖井式等，应用最广泛的是灯泡式。

2）该机组主要特点：发电机与水轮机直接连接，中小容量水轮发电机也可通过齿轮增速器与水轮机连接，布置在流道中，并装设在同一个灯泡形的壳体内。通常将发电机布置在上游侧，如图 2.4-4 所示。它具有结构布置紧凑、机组质量较轻等优点；但结构复杂，有防潮、防漏等特殊要求。

3）由于灯泡式水轮发电机安装在水下流道中，它的电磁和结构设计、通风冷却方式和励磁系统的选择等都应能适应在水下环境运行的要求。

1.1.3 发电电动机

1）随着电网容量的急剧增加，以及火电和核电容量所占比重的增加，使系统调频及负荷峰谷差矛盾更显尖锐，调峰用抽水蓄能电站的需求越来越迫切。为此，发电电动机得到迅速的发展和应用。它是一种用于抽水蓄能电站既作发电机又作电动机运行的三相同步电机。为提高电站建设的经济性，发电电动机正朝着大容量、高转速方向发展，参见本章表 2.4-14。

2）发电电动机的结构与相应容量和转速的常规水轮发电机相似，如图 2.4-5（悬式）及图 2.4-6（半伞式）所示。

3）发电电动机要在两个旋转方向运行，推力轴瓦和导轴承瓦不能采用偏心支承方式，瓦面及通风冷却系统的设计也要考虑适应双向运行的要求。

4）发电电动机起、停机和工况转换频繁，在每一工况下还要改变负载，以满足调峰的需要，因而在结构上要考虑受力较大部件的低周疲劳（寿命评估分析计算）和相邻部件的冷热涨差等问题。

5）发电电动机的设计还应满足电动机工况起动的要求。

1.2 型号

产品型号采用标准的汉语拼音字母，以及国际通用符号和阿拉伯数字组成。水轮发电机产品型号示例如下：

1）SF 200-30/9500
- SF：水轮发电机
- 200：额定功率(MW)
- 30：极数
- 9500：定子铁心外径(mm)

2）SFG 45-44/5850
- SF：水轮发电机
- G：贯流
- 45：额定功率(MW)
- 44：极数
- 5850：定子铁心外径(mm)

3）SFD 60-8/3800
- SF：水轮发电机
- D：电动机
- 60：额定功率(MW)
- 8：极数
- 3800：定子铁心外径(mm)

4）SFW 6000-10/2130
- SF：水轮发电机
- W：卧式
- 6000：额定功率(kW)
- 10：极数
- 2130：定子铁心外径(mm)

5）SFS 700-80/19720
- SF：水轮发电机
- S：定子线圈水冷、转子线圈及定子铁心空冷
- 700：额定功率(MW)
- 80：极数
- 19720：定子铁心外径(mm)

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

6) SF SS 300-48/12640——双水内冷水轮发电机
——定子铁心外径(mm)
——极数
——额定功率(MW)
——定.转子线圈水冷.定子铁心空冷
——水轮发电机

7) SF ZF 10-6/2410——蒸发冷却水轮发电机
——定子铁心外径(mm)
——极数
——额定功率(MW)
——蒸发冷却
——水轮发电机

2 主要技术数据

2.1 额定容量和额定功率

1) 额定容量 S_N 和额定功率 P_N 分别用 MVA (kVA) 和 MW (kW) 表示。它是综合考虑电站水能的有效利用、保证系统正常供电、机组制造的可能性和经济性、机组在电力系统运行调度的灵活性以及检修和电站布置方便等因素确定的。通常 S_N 或 P_N 在招标文件或技术协议中已明确规定。

2) GB/T 7894—2001《水轮发电机基本技术条件》明确规定：允许用提高功率因数的方法把水轮发电机的有功功率值提高到额定容量值。

3) 对发电电动机，其额定容量和额定功率规定如下：发电工况输出的容量和电功率分别用 MVA(kVA)和 MW(kW)表示；电动工况输出的轴机械功率用 MW(kW)表示。

2.2 最大容量

1) 为适应电站水库调节及充分有效利用水能，要求水轮发电机设置一个比额定容量约高 5%～15%的容量，即最大容量 S_{max} 与最大容量相对应的功率因数、电气参数值、允许温升以及与连续运行有关的产品性能应在专用技术协议中规定。

2) 有些水电站，机组运行水头变幅较大，为满足水轮机在高水头有较宽的稳定运行范围，要求水轮发电机设置最大容量，以便与水轮机高水头稳定运行的最大出力相匹配。以三峡电站为例，水头变幅达 52m，水轮发电机的额定容量和额定功率分别为 778MVA 和 700MW，而对应的最大容量和最大功率则分别为 840MVA 和 756MW。

2.3 额定电压

1) 额定电压 U_N 应符合国家标准 (GB 156—1993) 的规定，即为 3.15kV、6.3kV、10.5kV、13.8kV、15.75kV、18kV、20kV、22kV、24kV、26kV。

2) 额定电压是一个综合性的参数，它的选取应与发电机的技术经济指标 (效率、温升、技术参数、重量、稳定性等)、电站的变压器、断路器、电压及电流互感器等配套设备的容量、规格等选择相适应。

3) 对一定容量和冷却方式的发电机，可根据电压与绕组支路数和槽电流的最佳匹配，选取合理的额定电压。在发电机电磁负荷取值合适的条件下，额定电压选得低，电机消耗的绝缘材料和有效材料可相应减少；但降低电压将使发电机的铜环引线和发电机与变压器间的连接母线用铜量增加，应综合考虑其经济性并全面分析论证确定，推荐按表 2.4-2 选择发电机的额定电压。

表 2.4-2 额定容量与额定电压的关系

S_N (MVA)	U_N (kV)
20 以下	6.3 及以下
20～100	10.5～13.8
80～200	13.8～15.75
180～400	15.75～18
300～700	18～20
600～900	20～22 (24)

2.4 额定功率因数

1) 额定功率因数 $\cos\varphi_N$ 是发电机的额定有功功率 P_N (MW 或 kW) 与额定容量 S_N (MVA 或 kVA) 的比值

$$\cos\varphi_N = P_N / S_N \qquad (2.4\text{-}1)$$

2) 在输出有功功率一定的条件下，提高功率因数，可提高发电机有效材料的利用率，减轻发电机的总重量，并可提高发电机的效率；但将使发电机的视在输出功率 (MVA 或 kVA) 和稳定性降低。因此，发电机额定功率因数的选择应从发电机的造价、电力系统无功补偿装置的影响和投资以及输送无功容量的要求和造成功率损失等方面综合考虑、论证确定。

3) 近年来，由于采用快速励磁系统来满足稳定性要求，使发电机的功率因数由原来的 0.85～0.9 提高到 0.875～0.975。常规水轮发电机和发电电动机的额定功率因数可分别按表 2.4-3 和表 2.4-4 选取。

表 2.4-3 常规水轮发电机额定容量与额定功率因数关系

S_N (MVA)	$\cos\varphi_N$ (滞后)
$S_N \leqslant 50$	$\geqslant 0.8$
$50 < S_N \leqslant 200$	$\geqslant 0.85$
$S_N > 200$	$\geqslant 0.9$

表 2.4-4 发电电动机额定容量与额定功率因数关系

S_N (MVA)	$\cos\varphi_N$	
	发电工况 (滞后)	电动工况 (超前)
$S_N \leqslant 200$	$\geqslant 0.875$	$\geqslant 0.95$，通常取 0.975
$S_N > 200$	$\geqslant 0.9$	

2.5 额定转速

1) 额定转速 n_N 是根据水轮机的转轮型式、工作水头、流量和效率等因素确定的。为满足发电机电磁设计 (电压、绕组支路、槽电流合理匹配；接线及性能要求)、结构布置 (缩小体积、减轻重量及通用性要求) 及通风冷却方式 (空冷或内冷) 的需要，应对几种可能采用的转速进行分析论证确定。

2) 水轮发电机的额定转速优先在下表所列的转速(r/min) 中选择。

1500	1000	750	600	500	428.6	375	333.3	300
250	214.3	200	187.5	166.7	150	142.9	136.4	125
115.4	107.1	100	93.8	88.2	83.3	75	71.4	68.2
62.5	60							

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.6 飞逸转速

当水轮发电机组在最高水头下运行而突然甩负荷，如水轮机的调速系统及其他保护装置失灵，导水机构发生故障致使导叶开度在最大位置，在此工况下机组可能达到的最高转速称为飞逸转速 n_r。它与水轮机的转轮型式和最高水头等有关，飞逸转速的范围如下：

混流式或冲击式水轮机：$n_r=(1.6\sim2.2)n_N$(r/min)。

转桨式水轮机：当保持协联关系❶时，$n_r=(2.0\sim2.3)n_N$(r/min)。

转桨式水轮机：当破坏协联关系时，$n_r=(2.4\sim2.6)n_N$(r/min)。

贯流式水轮机：当破坏协联关系时，$n_r=(2.8\sim3.1)n_N$(r/min)。

2.7 飞轮力矩

1）飞轮力矩 GD^2 是发电机转动部分的重量与其惯性直径二次方的乘积。机组的 GD^2 主要由发电机的 GD^2 决定，因水轮机的 GD^2 很小、通常只占机组的约 10%。GD^2 直接影响发电机甩负荷时的速度上升率和系统负荷突变时发电机运行的稳定性。它对电力系统的瞬态过程和动态稳定性有很大影响。通常 GD^2 在招标文件或技术协议中已明确规定，设计必须予以保证。

2）GD^2 与机组的速度上升率 β❷和水轮机引水管道内的压力上升率是互相制约的。在 β 值一定时，如允许较大的 ξ 值，则 GD^2 可减小。采用水轮机调速器分段关闭技术可较好地解决 GD^2、β 和 ξ 三者间的制约关系。β 和 ξ 的详细计算，见参考文献 [1]。

3）通常 GD^2 是由水轮机的调节保证计算确定的。调保计算，实质上是解决水力惯性、机组惯性和调整性能三者矛盾，以期达到水工建筑和机组造价最省的目的。因此，应在发电机转子磁轭机械应力及技术经济条件许可下尽量予以满足。当发电机的基本尺寸确定后，发电机本身能提供的 GD^2 值可按下式估算

$$GD^2=KD_i^{3.5}l_i \tag{2.4-2}$$

式中，GD^2 为飞轮力矩，kN·m²；D_i 为定子铁心内径，m；l_i 为定子铁心长度，m；K 为经验系数，按表 2.4-5 选取。

表 2.4-5 经验系数 K

n_N (r/min)	60～93.8	100～375	428.6～750
K	54～49	53～48	52～47

2.8 机械时间常数与储能常数

1）机械时间常数 T_{mec} 表示在发电机额定转矩作用下，把转子从静止状态加速到额定转速所需的时间，按下式计算

$$T_{mec}=2.8GD^2\ (n_N/100)^2/P_N \tag{2.4-3}$$

式中，T_{mec} 为机械时间常数，s；GD^2 为飞轮力矩，kN·m²；n_N 为额定转速，r/min；P_N 为额定功率，kW。

2）机械时间常数与发电机额定转速的关系见表 2.4-6。

表 2.4-6 机械时间常数与发电机额定转速的关系

n_N (r/min)	750～428.6	375～200	200～60
T_{mec} (s)	3～6	4～8	6～10

注 通常采用液体内冷水轮发电机的 GD^2 比空气冷却的小，T_{mec} 应取其下限值。灯泡贯流式水轮发电机受灯泡比限制，GD^2 较小，$T_{mec}=0.8\sim2$s。

3）国外一些制造厂（公司）习惯用储能常数 H（能量系数）表示发电机转子储存的能量，其表达式为

$$H=1.395GD^2n_N\times10^{-4}/S_N \tag{2.4-4}$$

机械时间常数与储能常数的换算关系如下

$$T_{mec}=2H/\cos\varphi_N \tag{2.4-5}$$

2.9 短路比

1）短路比 SCR。可用空载额定电压时的励磁电流 I_{f0} 与三相稳态短路电流为额定值时的励磁电流 I_{fk} 的比值表示

$$SCR=\frac{I_{f0}}{I_{fk}}\approx\frac{1}{X_{ds}} \tag{2.4-6}$$

式中，X_{ds} 为直轴同步电抗饱和值（标么值），若忽略磁饱和的影响，短路比与直轴同步电抗互为倒数关系。

2）短路比是根据电站输电距离、负荷变化及机组稳定性要求等因素综合确定的。短路比大，可提高发电机在系统运行的静态稳定性，发电机的充电容量也相应增大，但电机转子用铜量增加，成本提高。水轮发电机的短路比一般为 0.9～1.3，标准值为 1.1。

3）由于采用快速励磁系统，近年设计制造的大容量空冷水轮发电机的短路比取值呈下降趋势。通常短路比在招标文件或技术协议中已明确规定。电磁设计时，可通过有效调整气隙长度获得目标值。典型大容量水轮发电机主要技术参数（SCR）统计见表 2.4-7。

2.10 直轴瞬态电抗

1）直轴瞬态电抗 X'_d 是根据电力系统稳定性计算确定的，在发电机电磁设计时应予以满足。它对发电机的动态稳定极限和突然增加负荷时的瞬态电压变化率有较大影响。X'_d 越小，动态稳定极限越大，瞬态电压变化率越小。减小电负荷可使 X'_d 减小（$A\propto\sqrt{X'_d\tau}$，A 为电负荷，τ 为极距），但要增加定子铁心的质量，导致发电机外形尺寸增大，成本提高。当电磁负荷确定，X'_d 值主要由定子绕组和励磁绕组的漏抗值确定。

2）对采用液体介质内冷的大容量水轮发电机，由于电负荷极大提高，其 X'_d 通常要比空冷的略大。设计时可采用浅槽、降低极身高度、极靴为多段圆弧均匀气隙结构等，以降低漏抗。空气冷却水轮发电机的 $X'_d=0.24\sim0.36$。通常 X'_d 值在招标文件或技术协议中已明确规定。典型大容量水轮发电机主要技术参数（X'_d）统计见表 2.4-7。

❶ 转桨式水轮机转轮叶片可随负荷变化与导水机构协联动作，使水轮机保持在高效率下运行。

❷ 机组甩去负荷、在导水机构关闭过程中，由于水流惯性的影响，将使机组的转速和管道中压力升高。速度上升率 β 和压力上升率 ζ 的大小与水轮机导水机构关闭时间以及管道特性参数等有关。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 2.4-7 典型大容量水轮发电机主要技术参数统计

序号	电站名称	S_N (MVA)	U_N (kV)	$\cos\varphi_N$	n_N (r/min)	SCR	X'_{d0} (标么值)	冷却方式	装机台数/首台机投运年份	备注
1	龙羊峡	356	15.75	0.9	125	1.1	0.35	空气冷却	4/1987	
2	岩滩	346	15.75	0.875	75	1.0	0.35	空气冷却	4/1992	
3	漫湾	286	15.75	0.875	125	1.1	0.33	空气冷却	5/1992	
4	水口	222/242	13.8	0.9/0.95	107.1	1.1	0.313	空气冷却	7/1993	
5	隔河岩	334	18	0.9	136.4	1.1	0.35	空气冷却	4/1993	
6	天生桥Ⅱ级	245/278	18	0.9	200	1.06	0.30	空气冷却	6/1993	
7	五强溪	267/280	15.75	0.9	68.2	1.1	0.32	空气冷却	5/1994	
8	二滩	612/642	18	0.9/0.95	142.9	1.1	0.32	空气冷却	6/1997	哈电和东电与加拿大GE公司合作设计制造
9	李家峡	445	18	0.9	125	1.0	0.35	空气冷却	3+1/1997	1#、2#及3#发电机采用空气冷却
10	天生桥Ⅰ级	334	18	0.9	136.4	1.0	0.342	空气冷却	4/1998	
11	小浪底	334	18	0.9	107.1	1.05	0.35	空气冷却	6/1999	哈电供1#、3#、5#机，东电供2#、4#、6#机。哈电为主包方
12	李家峡	445	18	0.9	125	1.1	0.36	蒸发冷却	3+1/1999	4#机采用液体介质内冷
13	三峡左岸	778/840	20	0.9	75	1.2/1.1	0.315/0.34	水内冷	14/2003	哈电与ALSTOM合作制造4#～6#及10#～14#机；东电与VGS集团合作制造1#～3#及7#～9#机
14	洪家渡	229	15.75	0.875	200	1.1	0.285	空气冷却	3/2004	
15	索风营	229	15.75	0.875	115.4	1.0	0.30	空气冷却	3/2005	
16	三板溪	278	15.75	0.9	166.7	1.1	0.30	空气冷却	4/2006	
17	龙滩	778	18	0.9	107.1	1.11	0.33	空气冷却	7/2007	哈电与ALSTOM公司合作制造。哈电为主包方，ALSTOM为技术支持方。东电供5#、6#机
18	水布垭	445/511	20	0.9	150	1.1	0.35	空气冷却	4/2007	东电供1#、2#机，哈电供3#、4#机。东电为主包方
19	三峡右岸	778/840	20	0.9	75	1.2/1.11	0.32/0.35	空气冷却	12/2007	东电、ALSTOM和哈电公司分别提供15#～18#机（水内冷）、19#～22#机（水内冷）及23#～26#机（空冷）
20	拉西瓦	757	18	0.925	142.9	1.05	0.325	空气冷却	6/2008	
21	瀑布沟	661/667	18	0.9	125	1.2/1.1	0.32/0.35	空气冷却	6/2009	
22	构皮滩	667	18	0.9	125	1.1	0.35	空气冷却	2+3/2009	东电和ALSTOM公司各制造2台机和3台机
23	金安桥	667	18	0.9	93.8	1.1	0.34	空气冷却	4/2009	
24	小湾	778	18	0.9	150	1.1	0.33	空气冷却	6/2009	哈电与ALSTOM公司以联合体方式合作制造
25	锦屏一级	649/700	20	0.925	142.9	1.05	0.35	空气冷却	6/2012	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.11 槽电流和定子绕组并联支路数

1）槽电流 I_s 为发电机定子每槽导体数与支路电流的乘积。在一定绝缘耐热等级下，槽电流与发电机的容量、电压、并联支路数 a、绕组型式及冷却方式等有关。槽电流太小，表明发电机有效材料的利用较差，不经济；槽电流太大，将导致铜损耗及附加损耗增加，从而使槽绝缘温差增大，在工艺上由于线圈表面增大，使制造较复杂。

2）目前国内外普遍认为，发电机的冷却方式不受每极容量的限制，而更注重对电压、支路与槽电流的合理匹配及热流密度分析计算和热负荷的控制。对转速和电压已确定的发电机，其可选支路数（对称）和槽电流相应确定。有的制造厂（公司）采用不对称支路绕组，以获得合适（经济）的槽电流。统计资料显示，这种发电机的设计制造经验和运行业绩是极其匮乏的，一般不推荐采用，尤其是特大型水轮发电机。对不对称支路绕组发电机，应对其电动势和电流的不对称度、支路间环流引起的损耗和发热、高次谐波和振动、绕组结构、布置和接线及其保护等进行全面分析和计算。

3）从控制热负荷并留有一定裕量考虑，槽电流通常取值范围为5500～6700A。随着现代计算技术的进步和发展，绝缘技术和水平的不断提高和对线圈散热性能的改善以及发电机通风冷却系统的改进，大容量空气冷却发电机的槽电流取值范围扩大为5500～7500A，而最高值可达8000A。空气冷却水轮发电机的槽电流值推荐按表2.4-8选取。典型水轮发电机和发电电动机的槽电流值统计数据分别见表2.4-13和表2.4-14。

表2.4-8 额定容量与槽电流的关系

S_N（MVA）	I_s（A）
10～120	2500～4200
130～300	4000～6000
300～600	5500～6500
600～900	6200～7500

2.12 电负荷和热负荷

2.12.1 电负荷

1）电负荷 A 是水轮发电机的主要技术经济指标之一，对电机的主要尺寸、参数（电抗）和绕组温升等有直接影响。

2）A 值大小决定了定子内圆单位表面积所产生的绕组铜损耗值（热流密度或热负荷）的大小，直接影响温升和效率值的高低。其取值与电机容量、绝缘等级及冷却方式等有关。随着通风冷却技术的改进和完善，绝缘技术的进步以及防止定子铁心膨胀翘曲的设计技术进步和发展，近15年来世界上已投运的水轮发电机，其电负荷值明显提高，并有进一步增大的趋势。

3）空气冷却水轮发电机的电负荷取值范围见表2.4-9。对水内冷和蒸发冷却的水轮发电机，其电负荷值可比空气冷却的提高约1.3～1.8倍。

表2.4-9 电负荷取值范围

S_N（MVA）	A（A/cm）
$S_N \leqslant 10$	200～500
$10 < S_N \leqslant 150$	450～700
$150 < S_N \leqslant 900$	600～920

注 大容量水轮发电机取上限值。

4）在主要尺寸一定条件下，漏电抗与 A 成正比，大容量发电机的短路附加损耗则近似地与 A 的二次方成比例。因此，A 对电机的参数和性能影响很大，A 与极距 τ 及直轴瞬态电抗 X'_d 有下述关系

$$A = K\sqrt{X'_{du}}\tau \qquad (2.4\text{-}7)$$

式中，A 为电负荷，A/cm；τ 为极距，cm；X'_{du} 为直轴不饱和瞬态电抗（标么值）；K 为经验系数，可按表2.4-10选取。

表2.4-10 经验系数 K

n_N（r/min）	K
≥375	135～140
300～187.5	140～145
166.7～107.1	145～150
100～88.3	150～155
≤83.3	155～160

注 高速大容量发电机取下限值。

2.12.2 热负荷

1）电负荷 A 与定子电流密度 J 的乘积 AJ 表示定子铜损耗在槽内的热负荷（热流密度）。它是有效控制定子绕组温升及确定发电机冷却方式的重要参数和衡量指标。AJ 选择过大，将导致槽绝缘内温差增大，线圈温升增高。

2）通常空气冷却大容量水轮发电机电流密度的取值范围为2.5～3.5A/mm²；中小容量的为3～4.5A/mm²。对定子线圈采用水内冷和蒸发冷却的水轮发电机，由于整体冷却效果好，电流密度可显著提高，其取值范围达4.5～7.5A/mm²。空气冷却水轮发电机的电流密度值推荐按表2.4-11选取。

表2.4-11 额定容量与电流密度的关系

S_N（MVA）	J（A/mm²）
10～100	3.6～2.6
80～500	2.9～2.5
400～900	3.2～2.8

3）近10年随着设计制造安装技术的进步和发展，国内外已成功投运和正在设计制造的水轮发电机的热负荷值显著提高，有的大容量电机取值高达3000A²/(cm·mm²)。为控制定子温升及铁心热胀变形，保证电机安全可靠运行，推荐按表2.4-12选取 AJ 值。按目前设计制造技术水平，特大型空气冷却水轮发电机的 AJ 值不宜突破2800A²/(cm·mm²)。对采用水内冷或蒸发冷却的水轮发电机，其 AJ 值宜取2900～3500A²/(cm·mm²)。当 AJ 值确定后，应采用有限元温度场计算程序对定子绕组和铁心的温度分布进行详细核算。

表2.4-12 额定容量与热负荷的关系

S_N（MVA）	AJ[A²/(cm·mm²)]
10～200	1800～2100
300～400	1900～2300
500～900	2200～2800

4）典型水轮发电机和发电电动机的电负荷和热负荷值统计分别见表2.4-13和表2.4-14。表中数据基本反映当代水轮发电机和发电电动机的技术水平和发展趋势。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 2.4-13 典型水轮发电机槽电流、电负荷和热负荷值统计

序号	电站名称	S_N/S_{max} (MVA)	U_N (kV)	$\cos\varphi_N$ (滞后)	n_N (r/min)	I_s (A)	A (A/cm)	AJ [A²/(cm·mm²)]	冷却方式	装机台数	首台机投运年份	制造厂(公司)	备注
1	大七孔	19	10.5	0.85	1000	2760	542	2030	空冷	2	2002	哈电	
2	中山包	47	10.5	0.85	500	2588	606	2520	空冷	1	2001	哈电	
3	恰甫其海	94/104	13.8	0.85	176.5	3938	640	2035	空冷	4	2005	哈电	
4	周宁	139	15.75	0.9	428.6	5091	745	2310	空冷	2	2004	哈电	
5	鲁布革	172	15.75	0.875	333.3	4204	758	3199	空冷	4	1988	哈电、西门子公司	哈电与德国西门子公司合作设计制造，哈电负责制造3#、4#机
6	水口	222/242	13.8	0.9/0.95	107.1	4649	698	1880	空冷	7	1993	哈电、日立公司	哈电为主包方，日立为分包方，后者负责前2台机推力轴承性能
7	索风营	229	15.75	0.875	115.4	4189	702	2303	空冷	3	2005	哈电	
8	洪家渡	229	15.75	0.875	200	5586	750	2340	空冷	3	2004	哈电	
9	天生桥Ⅱ级	245/278	18	0.9	200	5239	670	1481/1910	空冷	6	1992	哈电	
10	五强溪	267/280	15.75	0.9	68.2	4908/5147	677/710	1912/2105	空冷	5	1994	哈电	
11	三板溪	278	15.75	0.9	166.7	5096	755	2288	空冷	4	2006	哈电	
12	漫湾	286	15.75	0.875	125	5237	693	1833	空冷	5	1992	东电	
13	隔河岩	334	18	0.9	136.4	5346	781	2398	空冷	4	1993	哈电、加拿大GE公司	合作设计制造、等比换货、GE和哈电分别负责制造1#、2#机和3#、4#机
14	小浪底	334/360	18	0.9	107.1	5346/5774	767/827	2063/2398	空冷	6	1999	哈电、东电	哈电和东电分别负责制造1#、3#、5#和2#、4#、6#机。哈电为主包方
15	天生桥Ⅰ级	343	18	0.875	136.4	5346	781	2398	空冷	4	1998	哈电	
16	岩滩	346	15.75	0.875	75	5069	716	1904	空冷	4	1992	哈电	
17	龙羊峡	356	15.75	0.9	125	4345	735	1820	空冷	4	1987	东电	
18	李家峡	445	18	0.9	125	4752	742	2152	空冷	3+1	1997	东电	1#～3#发电机采用空气冷却
19	水布垭	445/511	20	0.9	150	5132/5902	818/941	2290/3019	空冷	2+2	2007	东电、哈电	东电和哈电分别负责制造1#、2#机和3#、4#机。东电为主包方
20	李家峡	445	18	0.9	125	4752	830	2855	蒸冷	3+1	1999	东电	4#发电机采用蒸发冷却
21	FOZ DO Areia	465	16.5	0.9	128.6	8136	719	2189	空冷	4	1980	ALSTOM	
22	Serra Da Mesa	473	15	0.9	120	6069	780	2332	空冷	6	1995	ALSTOM	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

序号	电站名称	S_N/S_{max} (MVA)	U_N (kV)	$\cos\varphi_N$ (滞后)	n_N (r/min)	I_s (A)	A (A/cm)	AJ [A^2/(cm·mm^2)]	冷却方式	装机台数	首台机投运年份	制造厂(公司)	备注
23	Churchill Falls	500	15	0.95	200	6415	834	3169	空冷	6	1967	ALSTOM	
24	瀑布沟	611/667	18	0.9	125	6415/7000	837/914	2260/2690	空冷	6	2009	东电	
25	二滩	612/642	18	0.9/0.95	142.9	6544/6864	857/899	2400/2641	空冷	6	1997	东电，哈电、GE公司合作设计制造	GE为主包方。东电和哈电为分包方，并分别负责制造6#机和5#机
26	锦屏1级	649/700	20	0.925	142.9	6245/6736	835/901	2405/2796	空冷	6	2012	哈电	
27	构皮滩	667	18	0.9	125	5346	767	2194	空冷	2+3	2009	东电，ALSTOM	东电和ALSTOM公司各制造2台机和3台机
28	金安桥	667	18	0.9	93.8	5346	859	2491	空冷	4	2009	东电	
29	拉西瓦	757	18	0.925	142.9	6937	897	2494	空冷	6	2008	哈电	
30	龙滩	778	18	0.9	107.1	6237	828	2608	空冷	7	2007	哈电、东电、ALSTOM公司合作制造	哈电为主包方。东电、ALSTOM为分包方，后者对主要技术性能负责。东电供5#、6#机
31	小湾	778	18	0.9	150	6237	822	2565	空冷	6	2009	哈电、ALSTOM公司合作设计制造	哈电与ALSTOM为联合体，哈电为责任方，ALSTOM为技术支持方
32	古里	700/805	18	0.9	112.5	5613/6455	723/831	2024/2659	空冷	10	1984	东芝、日立、三菱、西门子、GE公司	前5台机：东芝制造13#、19#机，日立制造15#机，三菱制造11#机，西门子制造17#机，后5台机(12#、14#、16#、18#、20#)由GE公司制造
33	依泰普	824	18	0.85/0.95	90.9/92.3	8810			水内冷	9+9	1985	原西门子和BBC公司	西门子和BBC公司分别制造1#～9#机(f=50Hz)和10#～18#机(f=60Hz)
34	三峡左岸	778/840	20	0.9	75	8984/9700	823/889	3111/3614	水内冷	14	2003	哈电、东电、ALSTOM、VGS集团合作设计制造	ALSTOM集团和VGS集团为主包方，哈电、东电为分包方。哈电和ALSTOM集团合作制造4#～6#机及10#～14#机，东电和VGS集团合作制造1#～3#机及7#～9#机
35	三峡右岸	778/840	20	0.9	75	5613/6060	800/864	2272/2649	空冷及内冷	12	2007	哈电、东电、ALSTOM	哈电、ALSTOM和东电分别独立设计制造提供23#～26#机(空冷)；19#～22#机(水内冷)及15#～18#机(水内冷)

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 2.4-14 典型发电电动机槽电流、电负荷和热负荷值统计

序号	电站名称	S_N/S_{max}（MVA）	P_{NG}/P_{NM}（MW）	U_N（kV）	$\cos\varphi_{NG}/\cos\varphi_{NM}$	n_N（r/min）	I_z（A）	A（A/cm）	AJ [A²/(cm·mm²)]	冷却方式	装机台数	首台机投运年份	制造厂（公司）	备　注
1	响洪甸	45.7/56.4	40/55	10.5	0.875/1.0	150～166.7	2514/3102	505/624	1485/2259	空冷	2	2000	东电（DFEM）	
2	回龙	67	60/65.6	10.5	0.9/1.0	750	3666	783	2741	空冷	2	2005	哈电（HEC）	
3	白山	165	145/168	13.8	0.88/0.91	200	4602/5212	728/825	2039/2617	空冷	2	2006	HEC	
4	HAüSLING（豪斯林）	200		19.5		600				定、转子水内冷	2	1986	VA-TECH	
5	十三陵	222	200/218	13.8	0.9/1.0	500	6198	825	2888	空冷	4	1995	VA-TECH HEC	VA-TECH 为主包方，哈电分包并提供 3#、4# 机主要部件
6	泰安	278	250/274	15.75	0.9/0.975	300	5095/5315	843/880	3270/3928	空冷	4	2005	VOITH FUJI	
7	宜兴	278	250/275	15.75	0.9/0.98	375	5095	750	2869	空冷	4	2007	GE	
8	张河湾	278	250/268	15.75	0.9/0.98	333.3	6794	830	2639	空冷	4	2007	FUJI	
9	Lam Ta Khong	282	254/268	16.5	0.9/0.95	428.6	4934	700	2960	空冷	2	1996	ALSTOM	
10	广蓄 1 期	334	300/334	18	0.9/0.975	500	7142	884	2811	空冷	4	1992	ALSTOM	
11	广蓄 2 期	334/380	300/312	18	0.9/0.975	500	5357/6095	818/930	2699/3495	空冷	4	1998	SIEMENS	
12	天荒坪	334/350	300/336	18	0.9/0.975	500	5357	775	2403/2649	空冷	6	1997	GE	
13	桐柏	334	300/336	18	0.9/0.975	300	5345	787	2597	空冷	4	2005	VA-TECH	
14	西龙池	334	300/320	18	0.9/0.975	500	5345	766	2727	空冷	4	2008	TOSHIBA MITSUBISHI	
15	惠州/宝泉	334/360	300/330	18	0.9/0.95	500	7142	834	2652	空冷	8/4	2008	ALSTOM HEC、DFEM	ALSTOM 为主包方，HEC 和 DFEM 为分包方，并分别制造宝泉 4# 机和惠州 4# 机
16	白莲河	334	300/325	15.75	0.9/0.975	250	6122	751	2238	空冷	4	2008	ALSTOM HEC、DFEM	ALSTOM 为主包方，HEC 和 DFEM 为分包方，并分别制造 4# 机的水泵水轮机和发电电动机

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

序号	电站名称	S_N/S_{max} (MVA)	P_{NG}/P_{NM} (MW)	U_N (kV)	$\cos\varphi_{NG}/\cos\varphi_{NM}$	n_N (r/min)	J_s (A)	A (A/cm)	AJ [$A^2/(cm \cdot mm^2)$]	冷却方式	装机台数	首台机投运年份	制造厂(公司)	备　注
17	蒲石河	334	300/322	18	0.9/0.98	333.3	7142	797	2120	空冷	4	2010	HEC ALSTOM	HEC为主包方，ALSTOM为分包方并予以技术支持
18	黑麋峰	334	300/325	18	0.9/0.975	300	5357	791	2159	空冷	4	2009	DFEM ALSTOM	DFEM为主包方，ALSTOM为分包方并予以技术支持
19	呼和浩特	334	300/320	18	0.9/0.975	500	7142	840	2730	空冷	4	2009	DFEM ALSTOM	DFEM为主包方，ALSTOM为分包方并予以技术支持
20	玉原 (Tamahara)	335	302/310	13.2	0.9/0.95	428.6	4178			空冷	2	1981	TOSHIBA HITACHI	
21	金谷 (Goldisthal)	331	265/261	18		333.3	7078			空冷	2+2	2002	VA-TECH	其中有2台机为可调速发电电动机：S_N=340MVA、P_N=300MW、n=（300～346.6）r/min
22	奥清津2 (Okukiyotsu)	355	320/320	16.5	0.9/0.95	428.6	3549			空冷	2	1995	TOSHIBA HITACHI	
23	木舟 (Muju)	343/373	336/365	18	0.9/0.98	450	5500/5980	713/775	2253/2663	空冷	2	1991	ALSTOM	
24	今市 (Imachi)	390	351/361	15.4	0.9/0.95	428.6	4178			空冷	3	1986	TOSHIBA	
25	三冲 (San Chong)	438	394/429	18	0.9/0.98	360	7024	836	2792	空冷	2	1994	ALSTOM	
26	葛野川 (Kazunogawa)	475	380/460	18	0.8/1.0	500	7618			空冷	1+1+2	1999/2007	HITACHI MITSUBISHI TOSHIBA	HITACHI和MITSUBISHI分别提供恒速的1#机和2#机。TOSHIBA提供可调速的3#、4#机
27	神流川 (Kannagawa)	525	473 /464	18	0.9 /0.95	500	5613			空冷	2	2005	HITACHI	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.13 磁负荷

1）水轮发电机电磁设计需确定的主要磁通密度有：气隙平均磁通密度 B_δ；1/3 齿高处的平均磁通密度 $B'_{z1/3}$；定子轭部平均磁通密度 B_j 及极身平均磁通密度 B_m。

2）和电负荷 A 一样，气隙平均磁通密度 B_δ 与电机的利用系数、运行性能及电气参数等有密切关系。在定子铁心内径和长度一定的条件下，AB_δ 乘积是一定的，但两者的具体取值以及由此所得的两者之间的比例关系将影响电机有效部分铜、铁材料用量的比例及铜损耗与铁损耗之间的分配，即对电机的技术经济指标有较大影响。在槽数及槽尺寸比等条件不变情况下，A/B_δ 越大，漏电抗越大，同步电抗也越大，因而对电机运行性能（起动特性、短路电流倍数、过载能力等）有直接影响。

3）在利用系数一定的情况下，B_δ 应尽可能取大些，以节约用铜，但 B_δ 值的提高受铁磁材料饱和的限制。

4）根据设计制造经验和技术进步与发展，水轮发电机磁路中各部分磁通密度通常采用的数值范围见表 2.4-15。

2.14 铁心和绕组温升

1）水轮发电机定子铁心硅钢片经严格去毛刺、磨光后双面涂 F 级环氧绝缘漆。定子线棒主绝缘采用 F 级环氧粉云母多胶模压或少胶真空液压浸渍（VPI）体系。转子磁极绕组匝间绝缘采用上胶 Nomex 纸或等同 F 级绝缘，而极身绝缘采用 Nomex 纸缠绕或其他相应 F 级绝缘结构。

2）尽管近 15 年，绝缘技术和水平不断提高和对线圈散热性能的改善以及发电机通风冷却系统的不断改进，为满足发电机各部件温升留有一定裕量，保证机组安全、可靠、长期稳定运行要求，目前水轮发电机的温升值系按 F 级绝缘进行设计，并按 B 级绝缘温升值进行考核。

3）空气冷却及液体直接冷却的水轮发电机在规定的使用环境条件及额定工况下，定子绕组、转子绕组和定子铁心等的温升限值应不超过表 2.4-16 的规定。对定子液体内冷的水轮发电机应特别注意电机冷却系统及其风量的正确选择和转子绕组温升值的匹配设计。发电机各部件的允许温升限值是重要性能保证指标之一，通常在招标文件或技术协议中已明确规定。

2.15 效率与损耗

2.15.1 额定效率 η_N 和加权平均效率 η_w

1）效率是水轮发电机的重要技术经济指标，它对电站运行经济性影响较大。应按照国家的技术经济政策，综合考虑发电机的制造成本及运行经济性等各个方面确定最佳效率值。

表 2.4-15 磁路各部分磁通密度取值范围

工 况	各部分磁通密度	取值范围（T）	备 注
空载额定电压	气隙平均磁通密度 B_δ	小容量：0.5～0.76 中容量：0.6～0.79 大容量：0.68～0.90	大容量发电机取上限，对内冷水轮发电机取 B_δ>0.8T
	1/3 齿高处平均磁通密度 $B'_{d/3}$	中、小容量：1.45～1.55 大容量：1.55～1.65	大容量发电机取上限
	定子轭部平均磁通密度 B_j	小容量：<1.35 中、大容量：1.2～1.45	大容量发电机取下限
	极身平均磁通密度 B_m	小容量：<1.4 中、大容量：1.3～1.45	大容量发电机取上限
额定负载、额定电压、零功率因数	1/3 齿高处平均磁通密度 $B'_{d/3}$	1.75～2.05	大容量发电机取上限
	极身平均磁通密度 B'_m	<2.0	当 B'_m>2.0T，极身磁路趋于饱和，导致总磁位降增加

表 2.4-16 定子绕组、转子绕组和定子铁心等部件允许温升限值 单位：K

热 分 级	B			F		
测量方法	温度计法	电阻法	检温计法	温度计法	电阻法	检温计法
水轮发电机部件						
空气冷却的定子绕组		80	85		100	105
定子铁心	80		85	100		105
液体内冷的定子绕组、转子绕组和定子铁心的出水	25		25	25		25
两层及以上的转子绕组		80			100	
表面裸露的单层转子绕组		90			110	
不与绕组接触的其他部件	这些部件的温升应不损坏该部件本身或任何与其相邻部件的绝缘					
集电环	80			90		

注 1. 考虑水轮发电机在非基准运行条件和定额（海拔超过 1000m；冷却空气温度超过 40℃及额定电压超过 11kV 等）可参照国标 GB 755—2000《旋转电机定额和性能》进行修正。

2. 对每天起停 2 次以上的水轮发电机，可考虑对本表中所规定的温升限值降低 5～10K。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2）水轮发电机的效率与它的容量、转速及冷却方式等有关。通常在转速相同的条件下，效率随机组容量的增大而提高；在容量相同条件下，高转速机组的效率要比低转速的高些。近来，随着高导磁、低损耗优质铁磁材料的应用，通风冷却系统的优化设计及推力轴承结构和瓦面材质的完善和改进等，使水轮发电机的效率进一步提高。

3）水轮发电机在额定容量、额定电压、额定功率因数及额定转速运行时的额定效率保证值的取值范围见表2.4-17。通常该值在招标文件和技术协议中已明确规定。

表2.4-17 额定效率保证值的取值范围

冷却方式	S_N（MVA）	η_N（%）
空气冷却	10～50	96～97.5
	50～300	97.5～98.3
	200～500	98～98.7
	500～900	98.5～98.8
液体内冷	500～900	98.5～98.8

4）加权平均效率是发电机在额定电压、额定转速及规定的功率因数和不同负荷工况下对应的加权效率值。加权平均效率保证值通常在招标文件或技术协议中也已明确规定，或由制造厂按下列公式计算确定

$$\eta_w = A\eta_1 + B\eta_2 + C\eta_3 + \cdots \qquad (2.4\text{-}8)$$

式中，A、B、C、…为对应规定的功率因数和不同负荷工况下的加权系数，由用户提供；η_1、η_2、η_3为对应规定的功率因数、负荷及加权系数的效率值。

5）水轮发电机的损耗和效率采用量热法在现场进行测定，参见GB/T 5321—2005《量热法测定电机的损耗和效率》。

2.15.2 损耗

1）计算效率时水轮发电机的损耗应包括：

①定子绕组铜损耗（按招标文件或技术协议规定的温度计算绕组电阻值）。

②转子绕组铜损耗（按招标文件或技术协议规定的温度计算绕组电阻值）。

③铁心损耗。

④风损及摩擦损耗。

⑤推力轴承损耗（发电机转动部分重量引起的损耗）。

⑥导轴承损耗。

⑦杂散损耗。

⑧励磁系统损耗（励磁变、整流器和电压调节器损耗）。

⑨其他损耗（对发电电动机设置的电动机风扇，则应计及风扇功率）。

2）当电压和功率因数一定时，铁损耗与负载无关；基本铜损耗和附加损耗与负载电流二次方成比例；转子绕组损耗与负载电流的二次方成比例；机械损耗与负载电流无关。

2.16 调相容量及充电容量

2.16.1 调相容量

1）水轮发电机具备长期作调相机运行的性能，向电力系统输送感性的无功功率，以改善系统的功率因数。运行时，它将从系统中吸取一部分有功功率以补偿其铜损耗、铁损耗及风摩损耗等。为减小水轮机（水泵水轮机）的水摩阻损耗，通常在转轮室中注入0.7MPa的压缩空气将水面压低，使转轮在空气中旋转。

2）水轮发电机的调相容量通常在招标文件或技术协议中已明确规定。制造厂按专用计算程序对其进行核算，以满足发电机转子温升不超过规定的允许值。一般可通过功率特性曲线近似确定调相容量值。水轮发电机的调相容量范围为（0.6～0.75）S_N。

2.16.2 充电容量

（1）进相运行

1）随着电力系统的发展，高压或超高压输电线路的容量和长度不断增加，使系统产生的容性无功功率相应增大。另外为补偿高峰负荷时的无功不足而装设的静电电容，在低负荷时产生的容性无功可能会超过感性无功，在电网某些点上出现电压超过规定值。因此，对水轮发电机提出作进相运行的要求，即发电机在欠励工况下，向系统输送容性无功功率和部分有功功率。水轮发电机进相运行时，具有下列特点：

①进相运行时，定子端部漏磁和由漏磁引起的损耗要比调相运行时增加，所以定子端部附近的金属件温度将升高，最高温度一般发生在铁心两端的齿部或压指。其值随发电机容性无功增加而增大，必要时，应对端部电磁场及热场进行有限元分析计算。

②水轮发电机是凸极式结构，其交直轴电抗不相等，电磁功率中有附加分量。因此，它比汽轮发电机有较大的进相运行能力。

③发电机进相运行时处于欠励状态，为保证进相运行安全稳定，机组的出力应按制造厂提供的功率特性曲线近似确定或经运行试验确定。

2）进相容量通常在招标文件或技术协议中已明确规定。要求在进相深度为0.95（$\cos\varphi = -0.95$）时发电机应能长期稳定运行。对更高的进相深度要求，由制造厂分析计算并与用户商定。

（2）充电运行

水轮发电机投入空载长距离输电系统运行称为“充电运行”，是进相运行的一种特殊方式，即$\cos\varphi=0$，发电机处于欠励状态运行。为满足发电机端电压不超过规定值，充电容量值通常在招标文件或技术协议中已明确规定。制造厂按专用计算程序对其进行核算，以满足相应励磁系统对稳定特性（最小稳定励磁电压）的要求。充电容量也可通过功率特性曲线近似确定。

3 设计计算

3.1 空载电压波形计算

1）为满足技术经济指标和性能参数要求以及避免分数槽绕组可能出现的振动和噪声，有些水轮发电机采用了整数槽。通常取每极每相槽数$q=3$，4，5，见表2.4-18。

2）整数槽绕组在接线和避免振动等方面均优于分数槽。其主要缺点是主极磁场中含有的高次谐波及气隙磁场周期性变化的脉动磁通，会在定子电动势波形中产生高次谐波和齿谐波，从而引起定子电动势波形畸变。在电磁（结构）设计时，应采取措施削弱和消除高次谐波（含齿谐波）。

3.1.1 改善电压波形的措施

1）定子铁心采用斜槽（斜极），通常选择斜过的距离b_c（cm）恰好等于K次谐波磁场的波长，即

$$b_c = 2\tau/K \qquad (2.4\text{-}9)$$

式中，τ为极距，cm。

一般斜一个定子槽距。斜槽是改善电压波形最有效措施之一，但使结构设计和制造工艺复杂，现场安装调整工作量

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

大、周期长。

2）采用每极阻尼绕组的对称线偏离直轴（d轴）1/4的定子齿距，实现相邻磁极阻尼绕组相对交轴（q轴）对称分布。大型水轮发电机和发电电动机应用实践表明，该措施效果良好。

3）合理设计选择和匹配定转子电磁参数及结构尺寸，即采取选择合适的阻尼绕组节距（使 $t_2/t_1=0.79\sim0.85$）；选择较大的 q 值（谐波磁场的含量减小，使电压波形畸变减小）；减小定子槽宽与气隙的比值（通常 $b_s/\delta<1.3$）以及选择合适的极弧系数等综合措施。近100台发电机（见表2.4-18）的成功投运和性能实测证明，这是控制和削减谐波既有效又简捷的措施。

表2.4-18 典型水轮发电机采用整数槽的槽数统计表

序号	电站名称	P_N (MW)	U_N (kV)	n_N (r/min)	Z	q
1	拉西瓦	700	18	142.9	504	4
2	小湾	700	18	150	480	4
3	构皮滩	600	18	125	576	4
4	金安桥	600	18	93.75	768	4
5	水布垭	460	20	150	480	4
6	李家峡	400	18	125	576	4
7	景洪	350	18	75	720	3
8	岩滩	302.5	15.75	75	720	3
9	隔河岩	300	18	136.4	528	4
10	天生桥Ⅰ级	300	18	136.4	528	4
11	三板溪	250	15.75	166.7	432	4
12	乌江渡	210	15.75	150	480	4
13	洪家渡	200	15.75	200	360	4
14	紫坪铺	190	13.8	150	480	4
15	万家寨	180	15.75	100	540	3
16	葛洲坝大机	170	13.8	54.6	990	3
17	白山（抽水蓄能）	150	13.8	200	360	4
18	棉花滩	150	15.75	166.7	432	4
19	金窝	140	15.75	375	192	4
20	百色	135	13.8	166.7	432	4
21	仁宗海	120	13.8	375	192	4
22	迪斯林	105	13.8	90.9	594	3
23	重庆江口	100	13.8	214.3	336	4
24	恰甫其海	94	13.8	176.5	408	3
25	高坝洲	84	13.8	125	432	3
26	小天都	80	13.8	428.6	252	6
27	埃塞 TEKEZ	78	13.8	300	300	5
28	响洪甸（抽水蓄能）	55	10.5	150	432	4
29	刘家峡小机	40	13.8	214.3	252	3
30	江口（灯泡贯流）	20	10.5	78.95	456	2
31	五强溪保安	15	10.5	273	330	5
32	古田	12.5	6.3	500	144	4
33	大寨	10	6.3	1000	108	6

3.1.2 波形畸变系数和电压谐波因数

波形畸变系数和电压谐波因数为发电机的主要性能参数，通常在招标文件或技术协议中已明确规定，制造厂按专用程序进行核算并予以保证。

1）波形畸变系数。水轮发电机定子绕组接成正常工作接法时，在空载及额定电压下，线电压波形正弦性畸变率应不超过5%。

2）电话谐波因数❶。水轮发电机在空载额定电压和额定转速时，线电压的电话谐波因数(THF)应不超过1.5%。

3.2 定子绕组次谐波振动计算

1）分数槽绕组能改善电动势波形，在水轮发电机（含发电电动机）得到广泛应用，一般 $1\frac{1}{2}\leqslant q\leqslant 5\frac{1}{2}$。

2）分数槽绕组产生的磁动势中常含有一系列分数次谐波。在某些情况下它们与主极磁场相互作用可能产生一系列干扰力。当某些干扰力的频率（倍频）和机座（铁心）固有振频重合时，将发生共振，引起定子铁心振动，导致定子线圈和其他结构部件损伤，以至出现重大事故。

3）通常招标文件或技术协议明确规定：水轮发电机定子铁心在对称负荷工况下，100Hz的允许双幅振动值不大于30μm。制造厂按专用程序进行核算，并对计算结果的范围控制为±20%，以免发生共振。如果不合格，采用改变定子尺寸、质量和频率甚至更换槽数的办法。

3.3 定子线棒特殊换位选择计算

1）电站实测和专题研究表明，大容量水轮发电机定子线棒导线采用常规的360°（罗贝尔）编织换位，在股线间存在较大的循环电流引起的附加损耗、股线电动势差及温差。实践证明，依据不同定子铁心长度选择空换位或不完全换位结构，是减小损耗及线棒股线温差的有效措施。

2）目前国内制造厂应用成熟的电磁场有限元程序，对线棒采用不同换位方式的股线温差、最大环流系数及平均环流系数等进行选择计算，同时还应考虑股线换位节距实现的可能性和对制造工艺的影响。换位节距应取整数值，可参照表2.4-19选取。

表2.4-19 线规与换位节距的关系 单位：mm

线规	高度	<1.95	<2.26	<2.44	<2.63	<2.83	<3.05
	宽度	<4.7	<5.5	<5.9	<6.9	<8.0	<9.3
换位节距		≥30	≥35	≥40	≥45	≥50	≥55

3.4 阻尼绕组计算

3.4.1 阻尼绕组作用及要求

1）通常水轮发电机的转子都装设直轴和交轴（连续的）阻尼绕组。

2）抑制由于调速系统失控或故障、水轮机转矩不均匀及外部负荷不稳定导致的转子自由振荡，提高电力系统运行稳定性。

3）削弱过电压的影响。

有的国外制造厂（公司）采用不连续的阻尼环，以简化结构，但削弱交轴阻尼作用。当发电机发生两相不对称短路时，定子绕组开路相将产生过电压，其值随 X''_q/X''_d 增大而

❶ 在IEC 60034-1《旋转电机-第1部分：定额和性能》（第十一版）中第9.11节已将电话谐波因数（THF）改为全谐波畸变（THD）。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

增大。开路相最大过电压幅值为

$$e_{max}=E\ (2X''_q/X''_d-1) \qquad (2.4\text{-}10)$$

式中，E为工频相电压幅值（标么值）；X''_q和X''_d分别为发电机交轴不饱和超瞬态电抗和直轴不饱和超瞬态电抗（标么值）。

通常招标文件或技术协议规定：$X''_q/X''_d=0.98\sim1.1$，但不得超过1.3。

4）提高发电机承担不对称负荷运行的能力和加速发电机自同期并入系统。

国标GB/T 7894—2001及相关标准规定：水轮发电机在不对称电力系统中运行时，如任意一相电流不超过额定电流（I_N），且其负序电流与额定电流之比（标么值）不超过下列数值时应能长期运行：

①额定容量为125MVA及以下的空气冷却水轮发电机不超过12%。

②额定容量大于125MVA的空气冷却水轮发电机不超过9%。

③定子绕组直接液体冷却的水轮发电机不超过6%。

5）国标及相关标准还规定：水轮发电机在故障工况短时不对称运行时，应能承受的负序电流分量（I_2）与额定电流（I_N）之比（标么值）的平方与允许不对称运行时间t（s）之积$(I_2/I_N)^2t$应为下列数值：

①空气冷却的水轮发电机为40s。

②定子绕组直接液体冷却的水轮发电机为20s。

3.4.2 阻尼绕组计算内容

制造厂应用专用程序对发电机的阻尼系统进行全面分析计算：

1）计算发电机在长期不对称负荷工况运行阻尼绕组的最高温升和温度值。通常阻尼条的最高温度计算值不超过150℃。此值应以不损坏该部件本身或任何与其相邻部件的绝缘为准。

2）计算发电机在相间不对称突然短路和单相对地不对称突然短路的阻尼条温升和温度值，并应计及阻尼条的集肤效应。通常阻尼条的最高计算温度值应不超过250℃。

3.5 定子端部电动力计算

1）当发电机突然短路或误同期并网时，产生很大的冲击电流，引起绕组各个导体间的机械力作用。随着发电机单机容量的不断提高（三峡、龙滩等700MW级发电机投运及白鹤滩1000MW级机组开发和研制），该机械作用力会急剧增大。为满足机组安全可靠稳定运行要求，制造厂应用专用程序对发电机在不同运行工况的绕组端部电动力进行分析计算。主要内容有：

①额定（最大）负荷稳态运行。

②额定（最大）负荷三相短路。

③空载额定电压三相短路。

④额定（最大）负荷两相短路。

⑤空载额定电压两相短路。

⑥空载额定电压120°误同期。

2）其中误同期工况定子端部承受的电动力计算值最大。绕组端部及连接线支撑和固定结构可据此进行设计和核算。

3.6 定子短路电流计算

1）通常发电机及其附属设备招标文件或技术协议要求制造厂提供定子三相突然短路电流计算值，供工程设计单位选用。制造厂应用专用程序计算对应于不同短路时间（0s、0.01s、0.1s、0.2s、0.4s、∞）的短路电流周期分量（有效值）、短路电流周期分量（峰值）及短路电流非周期分量。

2）对大容量水轮发电机，三相突然短路电流计算值与额定电流比值（标么值）约为11～13。

3.7 发电机误同期并网计算

1）水轮发电机满足并网的条件为：

①发电机的相序应与电网相同。

②发电机的频率应与电网相同。

③发电机励磁电动势应与电网电压大小相等、相位相同，即$E_0=U$。

2）当E_0与U相位不同（误同期）并网时，在发电机和电网中产生冲击电流、电机转轴产生冲击转矩。虽然发生误同期并网的概率极小，制造厂仍需应用功能齐全的仿真软件对发电机120°误同期并网时的U、V、W三相电流及电磁转矩瞬态过程进行全面分析计算，并应考虑电机和水轮机机械系统及饱和的影响。

3）对大容量水轮发电机，误同期并网冲击电流计算值与额定电流比值（标么值）约为9～12，而冲击转矩计算值与额定转矩比值（标么值）约为6～8。

3.8 主要结构部件刚、强度及固有频率计算

目前水轮发电机采用的主要结构部件均有成熟的设计、制造、安装和运行经验及实践。相应的计算技术和软件也是先进和成熟的。

3.8.1 上机架和定子

通常非承重上机架和定子的刚、强度及固有频率可作为独立单元进行分析计算，但应考虑相互间等效刚度的影响。为提高计算的准确度，建议将上机架与定子机座作为联合单元建模计算。

（1）刚、强度计算

上机架和定子联合单元考核工况及规定材料许用应力分别见表2.4-20和表2.4-21。

表2.4-20 考核工况及计算结果

序号	工况	载荷	计算结果
1	正常运行	定子（额定转矩、自重、温升、磁拉力）	应力分布、径向位移分布、环向位移分布、轴向位移分布、温度分布
		上机架（自重、温升）	应力分布、温度分布、轴向位移分布、径向位移分布
2	半数磁极短路	定子（自重、温升、半数磁极短路径向力）	应力分布、径向位移分布、轴向位移分布
		上机架（自重、温升、半数磁极短路径向力）	应力分布、径向位移分布、轴向位移分布

注 若上机架为承重机架，表中载荷应作相应变化（考虑推力负荷等因素），并可参照3.8.2项进行计算。

表2.4-21 最大许用应力 单位：MPa

材料名称	最大许用应力	
	拉应力	压应力
主要受力部件的碳素钢板	1/4U.T.S	1/4U.T.S
高应力部件的高强度钢板	1/3Y.S	1/3Y.S
其他材料	1/5U.T.S 或1/3Y.S	1/5U.T.S 或1/3Y.S

注 U.T.S为强度极限，Y.S为屈服极限。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

（2）固有频率计算

上机架和定子联合单元对振型和相应的关键固有频率计算内容参见表 2.4-22。

表 2.4-22 关键固有频率

序 号	振 型
1	定子铁心轴向
2	定子铁心倾斜
3	定子椭圆
4	定子平移
5	定子扭转

注 频率计算值应避免与水轮机的振动频率、水力脉动频率和它的倍频，或不对称运行时与转子和定子铁心的振动频率，或与电网频率和它的倍频，或与建筑物的振动频率产生任何可能的共振。

3.8.2 承重下机架

（1）刚、强度计算

1）应用专用有限元程序计算承重下机架的径向刚度、轴向刚度及挠度（轴向下沉量）。后者与机组的推力负荷、水轮机机坑尺寸及下机架高度等因素有关。推荐按表 2.4-23 选取挠度值。

表 2.4-23 承重下机架挠度允许限值

推力负荷（MN）	挠度值（mm）
≤5	0.5～1.5
5～10	1.5～2.0
10～15	2.0～2.5
15～35	2.5～3.0
35～55	3.0～3.5

注 推力负荷或水轮机机坑大者取上限值。

2）若下机架为非承重机架，可参照 3.8.1 项进行计算。

（2）固有频率计算

利用专用有限元软件计算下机架的轴向固有频率。该值应避开水轮机干扰振动频率计算值的±20%。

3.8.3 转子支架

转子支架的刚、强度振动计算和固有频率等考核工况及计算结果见表 2.4-24。

3.8.4 主要结构件的寿命评估

抽水蓄能电站的发电电动机，应能适应系统调峰、填谷、调频、调相、紧急事故备用、工况转换及频繁开停机（每台机日平均开停机次数不少于 5 次）双向运行要求。因此应对发电电动机频繁承受交变应力的关键部件，如转轴、定子机座垂直支撑立筋（直的或斜的）及磁极 T 尾和鸽尾等进行寿命分析计算。根据材料的寿命特性曲线，可确定机组出现非正常运行工况的次数与该构件允许使用寿命期限的关系。

表 2.4-24 考核工况及计算结果

序号	工况	载荷	计算结果
1	静止	结构件自重、打键（热加垫）配合力	应力分布、径向位移分布、轴向最大挠度
2	额定转速	磁轭和磁极重力、额定转矩、打键配合力	应力分布、径向位移分布、轴向振动固有频率
3	飞逸转速	磁轭和磁极重力	应力分布、径向位移分布

3.9 防止定子铁心热胀变形计算

1）发电机定子铁心直径随单机容量的提高，不断增大。三峡 700MW 级发电机定子铁心内径高达 18.8m。铁心与机座之间的温度差别存在热应力，导致铁心可能产生热胀变形，应予以高度重视。

2）通常制造厂应用专用程序分别计算定子铁心环向应力 σ_y 和定子铁心翘曲稳定性临界应力 σ_k，并认为铁心翘曲稳定性安全系数 K 满足下列条件，发电机可安全稳定运行

$$K=\sigma_y/\sigma_k>5 \qquad (2.4\text{-}11)$$

3.10 机组轴系稳定性计算

机组轴系的动态稳定、刚度和临界转速通常由水轮机和发电机制造厂（公司）分别计算和相互校核，主要由发电机制造厂负责。分析论证在正常和非正常运行工况下，所有轴承、轴承支撑件和建立的油膜是完好的。

3.10.1 发电机固有频率计算

应用专用程序分别计算发电机在空载、25%、50%、80%及 100%额定负荷及最大负荷时的振动固有频率。该值应与水轮机流道压力脉动和卡门涡频率、输水钢管流道中的压力脉动频率及电网频率等避开，不致产生共振。

3.10.2 临界转速计算

国标及相关标准规定：水轮发电机与水轮机组装完毕后，机组转动部分的第一阶临界转速应不小于最大飞逸转速的 120%。

3.10.3 动态响应计算

目前参照国际标准“ISO 1940—1973（E）G6.3 旋转体的不平衡量”计算机组转动部分的不平衡量。由此引起导轴承振动双幅值应符合国标 GB/T 8564—2003《水轮发电机组安装技术规范》。

3.10.4 轴系扭振固有频率计算

水轮发电机组转动系统的组成要比汽轮发电机组简单得多，且刚度也比后者大。电网波动和振荡对水轮发电机组轴系安全稳定运行很难造成影响。随着电网系统扩大和容量剧增，网机相互影响和干扰显得突出，应予以考虑。通常应用专用软件进行仿真计算，且计及前 5 阶的扭振固有频率值。

3.11 薄壳结构稳定性计算

灯泡式水轮发电机的泡头、中间环（锥壳）或冷却套的形状复杂，且厚度较薄，以满足制造简捷和高效冷却的需要，属于薄壳结构。在静水压力作用下，易产生局部失稳。应用专用程序对其刚度（稳定性）进行计算，对球壳与锥壳连接处的边界条件应予以特殊考虑。

3.12 发电电动机过转矩计算

国标 GB 755—2000 规定：发电电动机在电动机工况运行时应能承受 150%额定转矩持续 15s 而不失步，此时励磁电流应不超过额定值。专用软件计算表明：对按常规设计和选择主要尺寸及技术参数的发电电动机，该值可予以保证。

3.13 发电电动机起动特性计算

参见第 5 卷《水力发电工程》第 7 篇第 8 章。

3.14 发电电动机工况转换计算

参见第 5 卷《水力发电工程》第 7 篇第 8 章。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4 安装结构型式选择

水轮发电机的安装结构型式对电站主厂房高度、起重设备的负荷、机组自身的技术经济指标和运行稳定性以及维护检修等有直接影响，应综合考虑确定。

4.1 卧式

1）适用于小容量水轮发电机，采用两轴承或三轴承，轴承与发电机装在同一底板上，两轴承结构如图 2.4-7 所示。这两种结构型式均要求轴系临界转速不小于机组飞逸转速的 1.2 倍。

2）两轴承结构的机组轴向长度短、结构紧凑、安装调整方便，应优先采用；但当其轴系临界转速不满足要求或轴承负荷较大时，应采用三轴承结构。

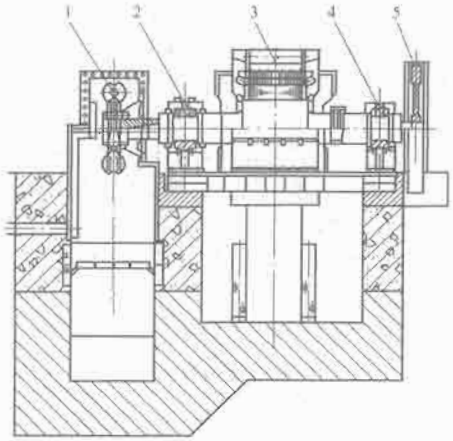


图 2.4-7 卧式两轴承水轮发电机组
（P_N=6MW，n_N=600r/min）
1—水轮机；2—径向、推力轴承；3—发电机；4—径向轴承；5—辅助飞轮

4.2 悬式和伞式

1）悬式和伞式发电机的区别在于推力轴承与转子的相对位置。推力轴承位于转子上部的称为悬式，位于下部的称为伞式，常用型式如图 2.4-8 所示。

2）悬式适用于中高速机组，优点是机组径向机械稳定性好、轴承损耗小、维护检修方便。

3）伞式适用于中低转速大容量机组。伞式机组总高度比悬式的低，可降低电站厂房高度，减轻机组重量；但因推力轴承直径大，轴承损耗比悬式机组的大。随着设计、制造、安装技术的进步和发展及对发电机结构部件刚、强度及轴系进行更准确的有限元分析计算，近年来大容量高转速机组广泛采用具有上、下导轴承的半伞式结构，如国内广蓄 1 期发电电动机（P_N=300MW，n_N=500r/min）及日本葛野川电站发电电动机（P_N=380MW，n_N=500r/min）。

4）目前极少采用图 2.4-8（d）二导全伞式结构。

5 水轮发电机结构

5.1 定子

由机座、铁心、线圈、端箍、铜环、测温装置及基础等部件组成，其典型结构如图 2.4-9 所示。

5.1.1 主要尺寸确定

1）铁心内径 D_i 和铁心长度 L_t 是定子的主要尺寸，选择时应考虑下列问题：

①电负荷和磁负荷应在合理的数值范围内，并使电气参数 X_d 等满足要求。

②选择的主要尺寸应使转子磁轭在正常宽度和应力下，自然满足机组所要求的 GD^2 值。

③由 D_i 和 L_t 所决定的定子和转子大部件的尺寸应满足运输条件的要求。

④满足发电机本身通风冷却的要求。

⑤机组总体结构布置合理。

2）忽略定子绕组阻抗压降，D_i 和 L_t 与容量及转速的额定值有下述关系

$$S_N = CD_i^2 L_t n_N = KAB_\delta D_i^2 L_t n_N \qquad (2.4\text{-}12)$$

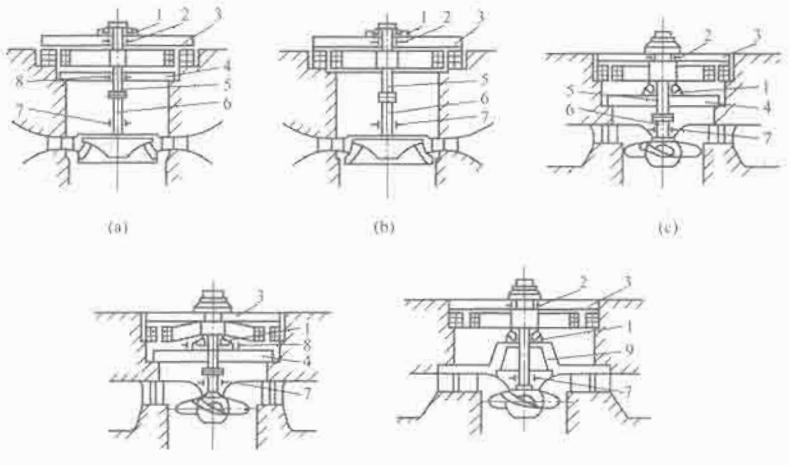


图 2.4-8 立式水轮发电机组安装结构型式
（a）三导悬式；（b）二导悬式；（c）二导半伞式；（d）二导全伞式；（e）二导半伞式
1—发电机推力轴承；2—发电机上导轴承；3—发电机上机架；4—发电机下机架；5—发电机轴；6—水轮机轴；7—水轮机导轴承；8—发电机下导轴承；9—水轮机顶盖

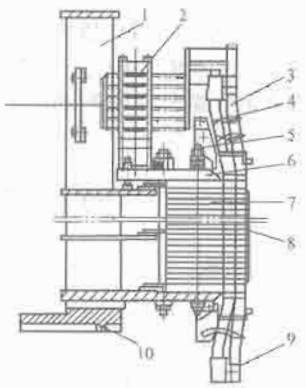


图 2.4-9 典型定子结构
1—机座；2—铜环引线；3—线圈；4—端箍；5—拉紧螺杆；6—齿压板；7—铁心；8—测温装置；9—绝缘盒；10—基础板

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式中，S_N 为额定容量，kVA；D_i、L_t 分别为铁心内径和铁心长度，m；C 为利用系数，kVA/（m^3 · r/min）；n_N 为额定转速，r/min；K 为常数，取 1.35×10^{-6}；A 为电负荷，A/cm；B_δ 为空载气隙平均磁通密度，G。

3）可通过适当地选择电、磁负荷或利用系数初步确定 D_i 和 L_t 值。

①铁心内径选择。对多极电机，一般先确定极距，再算出铁心内径

$$D_i=2p\tau/\pi \tag{2.4-13}$$

式中，τ 为极距，cm；p 为极对数。

初步选择极距，可采用以下几种方法：

（a）经验公式

$$\tau=K_1\sqrt[4]{\frac{S_N}{2p}} \tag{2.4-14}$$

式中，τ 为极距，cm；K_1 为系数，$K_1=9.0\sim12.5$（中容量），$K_1=8.3\sim10.7$（大容量、高转速取上限）。

（b）按机械强度允许的最大圆周速度选择。高转速水轮发电机每极容量和极距较大，转子机械强度是决定极距的主要因素，可按最大允许周速（以定子铁心内径计算）确定极距。

因为以 cm 计算的 τ 值，在数值上等于额定转速时（频率为 50Hz），以每秒米计算的转子圆周速度 v_t，所以当飞逸转速时，有下列关系

$$\tau=\frac{v_t}{K_\tau} \tag{2.4-15}$$

当频率不等于 50Hz 时

$$\tau=\frac{v_t}{K_\tau}\frac{50}{f} \tag{2.4-16}$$

式中，v_t 为飞逸转速时转子圆周速度，m/s；K_τ 为飞逸系数，是机组飞逸转速与额定转速的比值。

各种转子结构允许选用的最大周速值见表 2.4-25。

表 2.4-25　　转子磁轭允许选用的最大周速值

磁轭结构型式	磁极固定方式	材料屈服强度 σ_s（MPa）	最大圆周速度 v_{max}（m/s）
叠片磁轭	T尾或鸽尾	350～690	130～180
整锻或钢环磁轭	T尾或鸽尾、梳齿结构、螺栓	300～360	140～180

（c）按所要求的 GD^2 值选择。对于低速、小极距、转子圆周速度低的水轮发电机，飞轮力矩是决定内径的主要因素，应在满足所要求的 GD^2 和需要风量的条件下选择最小极距。

$$\tau=13K_2\sqrt[4.5]{\frac{S_N}{p^{1.8}}} \tag{2.4-17}$$

式中，K_2 为系数；$K_2=f(L_t/\tau)$，如图 2.4-10 所示。

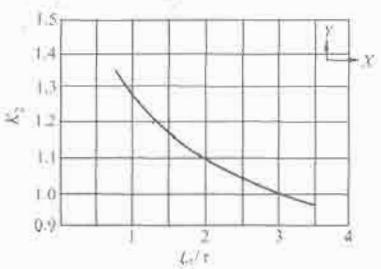


图 2.4-10　K_2 与 L_t/τ 关系

②铁心长度选择

$$L_t=\frac{S_N}{D_i^2n_NC} \tag{2.4-18}$$

中容量和大容量水轮发电机利用系数与每极容量的近似关系为

$$C=K_3\left(\frac{S_N}{2p}\right)^{0.16} \tag{2.4-19}$$

式中，K_3 为系数，对中容量水轮发电机，$K_3=1.46\sim1.86$；对大容量水轮发电机，$K_3=1.58\sim1.95$；对特大容量的水轮发电机，由于受到转子磁轭材质机械应力的限制，定子铁心内径不能加大，只好增加定子铁心长度。对长铁心电机的通风冷却系统设计，应特别予以重视。

5.1.2　机座

（1）作用及分类

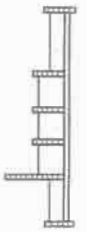
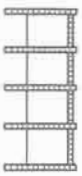
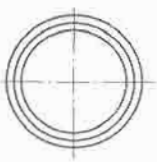
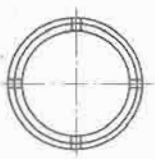
1）用以固定铁心和绕组，呈圆形或多边形。小容量水轮发电机多采用铸铁或整圆机座，或采用钢板焊接的箱形机座。中、大容量水轮发电机的机座由 12～80mm 厚的钢板制成的壁、环、立筋及合缝板等零件焊接组装而成。

2）立式机座承受轴向荷重、定子自重及电磁扭矩并传递于基础上。顶环与上机架连接，下环与基础板连接，下环与基础板间设有径向或轴向销钉，承受短路切向剪力。

3）机座应有足够刚度，还应能适应铁心的热变形，使铁心在热胀时不会对机座产生过大的压应力，引起铁心产生变形。

4）机座的各种结构型式见表 2.4-26。

表 2.4-26　　机座的结构型式

结构分类	按截面形状分	
示意图		
特点	有上环与下环的机座，传统结构，广泛采用	无上环、下环的机座，结构简单，但较少采用
结构分类	按整圆或分瓣分	
示意图		
特点	整圆机座，适用于铁心外径 $D_i\leqslant3$m 的结构	分瓣机座，适用于铁心外径 $D_i>3$m 的结构，按直径大小可分为 2、3、4、6 或 8 瓣

5）通常，卧式机座的刚度应比相同机座号的立式机座的大。由不平衡磁拉力和定子自重所产生的挠度 f 与最小气隙 δ_{min} 的比值应满足

$$\frac{f}{\delta_{min}}\leqslant4\%$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

(2) 主要尺寸确定

参见参考文献 [2]。

(3) 机座刚度及其运输

1) 机座在加工、运输、安装及运行过程中将受到机械力及电磁力的作用。机座尺寸初步确定后，应对其刚度进行核算。

2) 由于水电站地理位置及运输条件的限制，机座的外形尺寸应满足运输尺寸的要求。

5.1.3 铁心

1) 定子的一个重要部件，也是磁路的主要组成部分并用以固定绕组。在发电机运行时，铁心承受机械力、热应力及电磁力的综合作用。

2) 由扇形片、通风槽片、定位筋、齿压板及拉紧螺杆等零部件装压而成。定位筋通过固定板固定在机座环上，扇形片、通风槽片叠装于定位筋的鸽尾上，并通过上、下齿压板及拉紧螺杆将铁心压紧成整体，如图 2.4-11 所示。

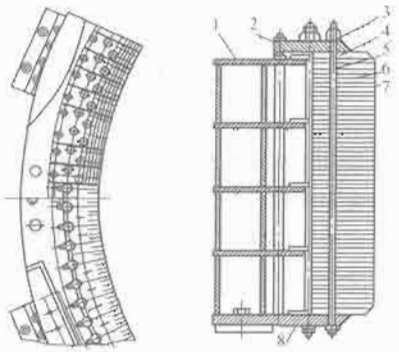


图 2.4-11 典型定子铁心结构

1—机座；2—齿压板；3—碟形弹簧；4—压指；5—拉紧螺杆；6—扇形片；7—通风槽片；8—定位筋

(1) 扇形冲片

1) 目前，水轮发电机采用无取向冷轧硅钢片，厚度为 0.5mm 或 0.35mm，硅钢片的性能及规格可根据招标技术规范要求计算确定。

2) 整张扇形片的槽数应为整数，并使片间接缝不在齿上。为避免叠片时相邻扇形片边缘搭叠，接缝边应留有 0.2mm 的间隙。为防止接缝处槽底错牙损伤线圈绝缘，应将接缝处的槽底直角处冲成斜坡，如图 2.4-12 所示。

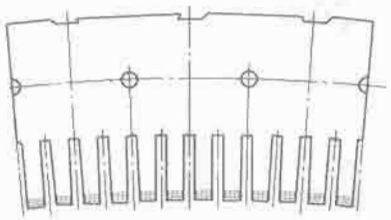


图 2.4-12 扇形冲片

3) 为保证扇形片叠装质量，整张扇形片应设置 2 个以上的定位筋槽，相邻定位筋槽的距离应小于 450mm。对齿部比较宽的铁心端部冲片，应在扇形片的齿部开设 2mm 宽的槽，以减小端部漏磁，如图 2.4-13 所示。

4) 大、中容量水轮发电机的定子扇形片两面各涂刷绝缘漆两层，两面漆膜总厚度为 0.02～0.025mm；或刷 133C 漆两层，两面漆膜总厚度为 0.015～0.02mm。涂漆前要求扇形片平直光滑，表面光洁并去除毛刺。

5) 扇形片叠装一般不允许正反叠，以免由于扇形片毛刺影响而增大铁心的涡流损耗，引起电机发热。通常在扇形片外边缘冲有 R3 的半圆标记缺口，以标示扇形片的正反面。

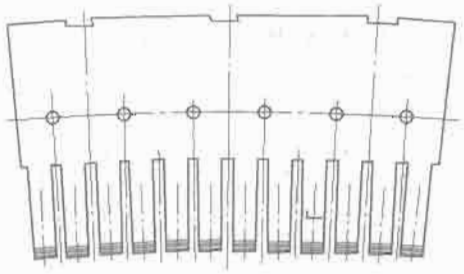


图 2.4-13 扇形冲片开槽示意

6) 对采用径向通风系统的大、中容量水轮发电机，每段铁心叠片长度以 30～45mm 为宜。对轴向通风系统，或液体内冷电机可采用每段铁心叠片较长的铁心段。

7) 铁心叠装前，应抽检每张冲片不同部位的厚度，以便确定补偿片应用的必要性及其位置和用量。

(2) 通风槽片

1) 由扇形片及固定于扇形片上的通风槽钢组成，如图 2.4-14 所示。

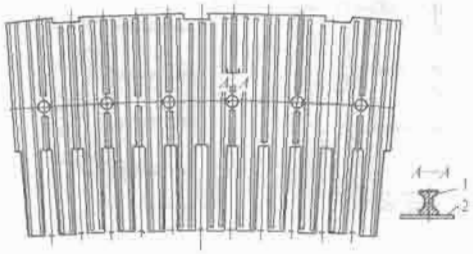


图 2.4-14 通风槽片

1—通风槽钢；2—扇形片

2) 扇形片的材料一般为 0.5mm、0.65mm、0.75mm 厚的硅钢片。为避免通风槽钢点焊热变形而引起扇形片齿部、槽底翘曲，导致叠片槽形错牙，需将扇形片扩槽，即沿齿槽周边冲去 2mm 的宽度。

3) 通风槽钢采用非磁性钢轧制而成，其高度为 5mm、6mm、8mm、10mm。采用点焊工艺将其固定于扇形片上，点焊间距以 100mm 为宜。

(3) 齿压板

由压板与齿压片构成。将齿压片焊在压板上，其中心偏差为 ±1mm。齿压板材料为 15～70mm 厚钢板 Q235 或 Q345。为减小端部涡流损耗，齿压片应采用非磁性扁钢。齿压板的厚度及齿压片的尺寸应根据应力计算确定。通常，为保证铁心叠装时齿部压紧，齿压片焊前应压弯，如图 2.4-15 所示。

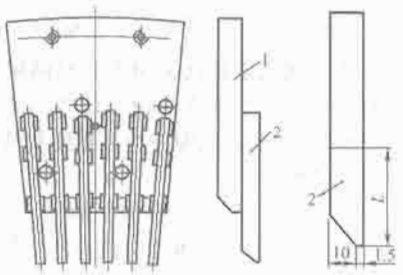


图 2.4-15 齿压板

1—压板；2—压指

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

(4) 定位筋

扇形片通过定位筋和托块固定在机座上。定位筋有单鸽尾和双鸽尾结构。单鸽尾定位筋由方钢加工而成，双鸽尾定位筋采用冷拉成型的型钢，如图 2.4-16 所示。

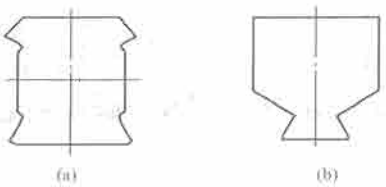


图 2.4-16 定位筋

(a) 双鸽尾定位筋；(b) 单鸽尾定位筋

(5) 拉紧螺杆

铁心的轴向固紧是通过拉紧螺杆受力伸长压紧齿压板实现的。螺杆的布置型式有两种：一种为穿心螺杆布置［见图 2.4-17 (b)］，适用于铁心宽度大于 400mm 的发电机；另一种为铁心外圆布置［见图 2.4-17 (a)］，适用于铁心宽度小于 400mm 的发电机。螺杆的材质选用冷拉 15CrMn 或 42CrMo 高强度调质合金圆钢。

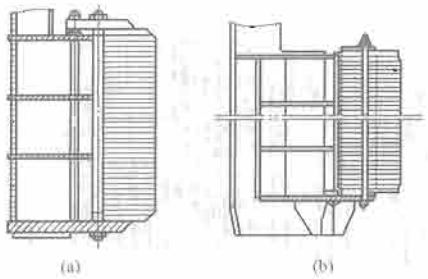


图 2.4-17 拉紧螺杆布置型式

(a) 拉紧螺杆铁心外圆布置；(b) 拉紧螺杆穿心布置

(6) 防止铁心热胀变形措施

铁心与机座间存在着温差，铁心热胀对机座产生压应力，致使定子铁心变形翘曲，易造成线圈绝缘损坏，影响机组安全运行。常用的预防措施：

1) 在机座与基础之间设置径向销，当温度升高时，机座可自由径向膨胀，如图 2.4-18 所示。

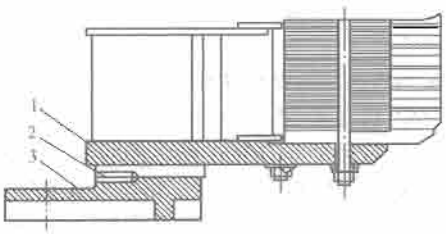


图 2.4-18 径向销结构

1—定子机座；2—径向销；3—基础板

2) 机座与铁心间的定位筋采用浮动双鸽尾定位筋（见图 2.4-19），即定位筋与机座之间设有适当间隙。当铁心热胀时，定位筋与机座之间的间隙变小，机座对铁心的反作用力变小，避免铁心翘曲。

3) 机座采用斜元件结构。铁心热胀时，机座环板与基础间的斜元件会弯曲变形，使机座对铁心的反作用力减小。

5.1.4 线圈（绕组）

绕组是交流电机进行机、电能量变换的关键部件。水轮发电机的定子绕组有单匝条式叠绕组（$N_s=2$）（N_s 为每槽有效导体数）、多匝圈式叠绕组（$N_s=4$，6，8，10）和单匝条式波绕组（$N_s=2$），如图 2.4-20 所示。

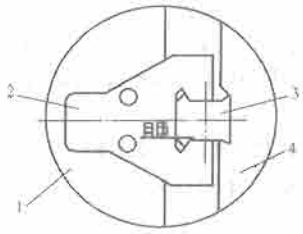


图 2.4-19 双鸽尾定位筋

1—机座环板；2—托块；3—双鸽尾定位筋；4—扇形片

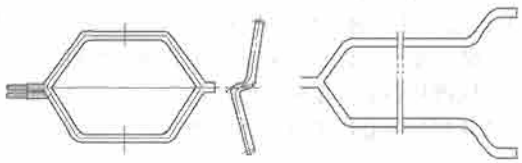


图 2.4-20 定子绕组结构型式

(a) 叠绕组；(b) 波绕组

(1) 叠绕组

圈式叠绕组的匝数和槽数比较容易调整，端部接线焊接工作量小。通常采用短节距（绕组节距比约为 0.85），可省铜和改善电压波形，但线圈之间和极间连接线较多，其总长度约等于定子铁心外径周长的 3 倍。适用于中小容量和部分大容量水轮发电机。

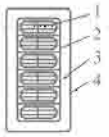
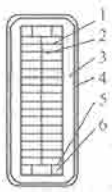
(2) 波绕组

条式波绕组的匝间绝缘可靠、端部连接线少、线棒股线可在槽内直线部分编织换位，以减小循环电流引起的附加损耗、嵌线和拆换较方便。双层波绕组适用于高电压、大容量水轮发电机。定子液体内冷发电机一般采用双层波绕组。

(3) 线圈绝缘结构

线圈绝缘包括股间、匝间、排间、换位、对地绝缘及防晕层等，见表 2.4-27。

表 2.4-27 定子线圈绝缘结构

线圈型式	绝缘结构图	序号	名 称
圈式		1	股间绝缘
		2	匝间绝缘
		3	对地绝缘
		4	防晕层
条式		1	股间绝缘
		2	排间绝缘
		3	对地绝缘
		4	防晕层
		5	换位垫片
		6	换位填充物

(4) 线圈电晕、电腐蚀及预防措施

参见本篇第 5 章。

(5) 绕组固定

发电机整个定子端部的支撑系统必须具有足够的刚、强度（相关计算参见本章第 3 节）。能承受正常和非正常运行工况电动力及振动的作用，避免绕组产生有害位移和变形，导致绝缘损伤、匝间短路等故障。槽部紧固件采用对头斜槽

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

楔。端部固定结构有端箍及支架、槽口垫块、斜边垫块、端部绑扎及防下沉支撑等。典型的定子线圈端部绑扎结构如图2.4-21所示。

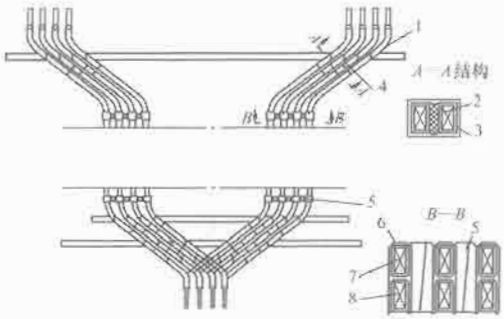


图2.4-21 典型定子线圈端部绑扎结构示意
1—线圈与端箍绑扎；2—斜边垫块；3—绑扎带；4—线圈斜边绑扎；5—槽口垫块；6—适形材料；7—上层线棒；8—下层线棒

(6) 绕组接线

1) 水轮发电机主要采用整数槽绕组或分数槽绕组。它们可以绕成叠绕组或波绕组，以构成圈式叠绕组或条式波绕组。在整数槽绕组中，每对极下每相所占相应槽号在磁场下所处的位置完全相同，每对极就组成一个循环，所以无论叠绕组或波绕组，其接线均较简单。

2) 对分数槽绕组，每一个极下每相所占槽数实际上是不相同的，部分极下多一个或少一个槽，但每一相在不同极下所占总槽数是相同的。由于水轮发电机的槽数较多，有些低速大容量水轮发电机的槽数竟多达800个以上，因此分数槽波绕组的接线是比较复杂的。而分数槽叠绕组的接线方法则和整数槽的基本一样，只是前者以单元电机的极对数进行循环连接。

3) 为满足绕组对称并得到最大电动势（即有较大的分布系数），三相整数槽绕组或分数槽绕组均采用60°相带。同时，在不影响发电机电磁性能的条件下，应使绕组的极间连接线数量最少、长度最短。

4) 条式波绕组的并联支路有两种布置法（见图2.4-22）：一种是集中布置，另一种是分布布置。集中布置可补偿由于气隙不均匀在支路内所引起的磁拉力，因此通常水轮发电机的并联支路采用集中布置。但由于气隙不均匀在支路内所引起的环流将产生一系列不对称的次谐波磁动势，从而使铁心的振动增大，故应予充分注意。

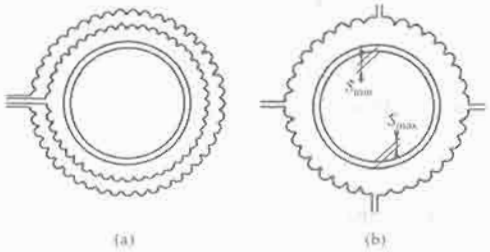


图2.4-22 各式波绕组的并联支路布置图
(a) 分布绕组；(b) 集中绕组

5) 水轮发电机定子绕组接线的方法、类型及示例详见参考文献[2]。

(7) 线圈（绕组）耐电压

参见本篇第5章。

(8) 定子故障

定子故障主要是由于线圈主绝缘和匝间绝缘损坏、绝缘击穿、接头开焊、紧固件松脱及介质泄露而引起的。其故障原因及预防措施详见表2.4-28。

表2.4-28 定子线圈故障及预防措施

事故分类	故障原因	预防措施
振动磨损	因电磁或机械振动，在槽口处将线圈防晕层和主绝缘磨损，造成单相接地或两相短路	采用斜槽楔或具有弹性的波纹板将线棒固紧在槽内，或将线棒胶固在槽内；采用适形材料，加强端部绑扎
绝缘击穿和绝缘水平下降	绝缘老化（包括年久绝缘龟裂、脱落及长期过负荷运行绝缘过热老化），线棒击穿	定期检查，更换绝缘龟裂、脱落的线棒；严格控制运行温度，增设定子接地保护及局部放电监测装置（PDD）
	由于绝缘局部缺陷而造成绝缘击穿	提高线圈制造质量，防止线圈绝缘机械损伤
	主绝缘内部游离放电及电腐蚀损坏绝缘；股线松散，折断造成接地短路	采用倒位运行（中性点换至主引出线）；用兆欧表测量线棒出槽口处表面电阻，当电阻大于$10^5\sim10^6\Omega$时，有电腐蚀；用超声波探测仪测量线棒电晕放电量；增设PDD装置
	油污长期浸蚀绝缘，使绝缘水平下降	注意轴承密封，清除线棒上的油污
接头开焊	连接线圈的接头松动，焊接质量不佳造成烧损，线棒单相接地或相间短路	改进接头结构，用涡流探测仪检查焊接质量
介质泄露	接头固定不牢，结构不合理等引起介质泄露导致线棒、铜环引线等短路接地	改进接头结构，固定牢靠，严格检测

5.2 转子

转子是变换能量和传递扭矩的主要部件，由转轴、转子支架、磁轭和磁极等部件组成（见图2.4-23）。其机械性能、制造和安装质量等是影响机组安全运行的重要因素。因此，转子结构设计应满足下列要求：

1) 有足够的刚度和强度，在飞逸转速时不发生有害变形，并在任何工况下不得失去稳定。

2) 结构合理，紧固件连接牢靠，有良好的电磁性能及通风结构。

3) 具有水轮机调节保证计算所要求的转动惯量。

5.2.1 转轴

转轴承受机组转动部分的重量和水推力产生的拉应力、转矩产生的剪应力和单边磁拉力引起的弯曲应力。转轴设计应满足的要求：①具有足够的强度。在额定负荷（最大负荷）和突然短路等工况，转轴任何一部分不能有残余变形和

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

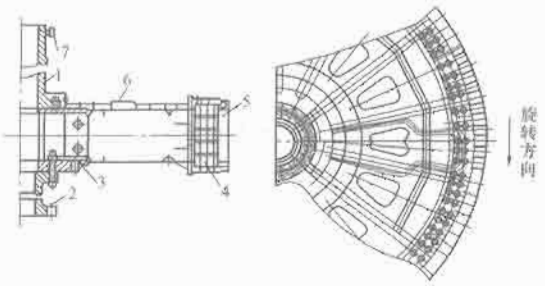


图 2.4-23 转子典型结构

1—上端轴；2—下端轴（主轴）；3—转子支架；4—磁轭；5—磁极；6—转子引线；7—集电环

损坏。②具有足够的刚度，其挠度必须在规定的范围内。③机组轴系的临界转速应高于飞逸转速的 120% 及以上，以防发生共振。

（1）结构型式及选择原则

有一根轴和分段轴结构，通常根据发电机的容量和转速选择其结构型式。

1）一根轴结构。高转速大容量悬式发电机一般选择一根轴结构，其上部装有推力头和上导滑转子。目前广泛采用的一根轴结构有以下几种型式：

①转轴与转子支架轮毂热套在一起。通过轴与轮毂的配合紧量或紧量与键传递扭矩（见图 2.4-24）。

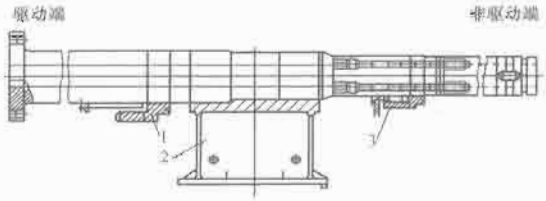


图 2.4-24 一根轴结构（与转子支架轮毂热套）

1—下导滑转子；2—转子支架；3—上导滑转子

②转轴与厚钢环磁轭热套在一起。采用轴与磁轭之间的紧量与键传递扭矩（见图 2.4-25）。适用于高转速中大容量机组。

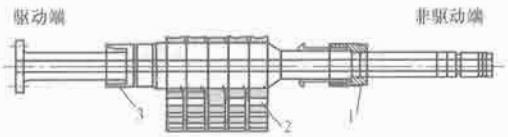


图 2.4-25 一根轴结构（与厚钢环磁轭热套）

1—上导滑转子；2—磁轭；3—下导滑转子

③对转速高于 750r/min 的发电机，采用将磁轭与转轴锻成一体的结构（见图 2.4-26）。

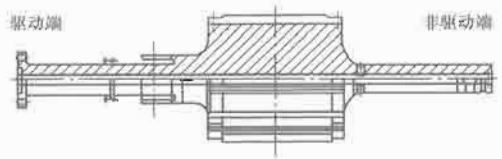


图 2.4-26 一根轴结构（磁轭与转轴锻成一体）

④为避免磁轭与转轴锻成一体引起加工和竖轴困难，可在轴上焊接或加工出支架，然后热套磁轭。因高应力区分布在磁极与磁轭的连接处，转轴可选用一般材质，而磁轭圈应选用高强度材质（见图 2.4-27）。

2）分段轴结构。

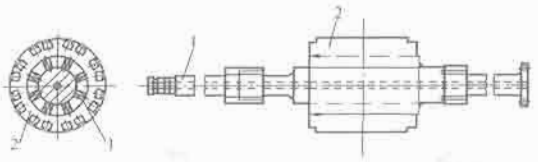


图 2.4-27 一根轴结构（转轴焊接支架）

1—转轴；2—磁轭

①中、低转速大容量伞式发电机多采用分段轴结构，由上端轴、转子支架中心体和下端轴组成。

②上端轴下部法兰与转子支架中心体通过螺栓连接，上部安装集电环或热套上导轴承滑转子及绝缘层，以防轴电流（见图 2.4-28）。

③下端轴上法兰与转子支架中心体连接，下法兰与水轮机轴连接。如厂房内起吊高程和结构布置允许，下端轴可与水轮机轴合为一体（见图 2.4-29）。

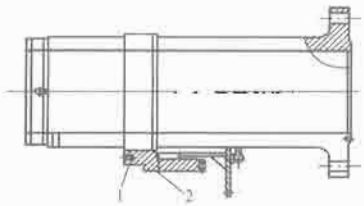


图 2.4-28 上端轴

1—轴绝缘层；2—上导滑转子

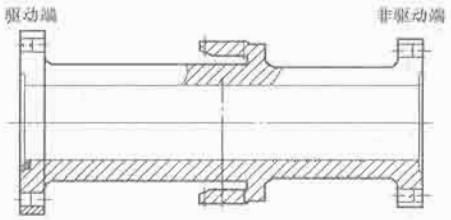


图 2.4-29 下端轴

④下端轴与转子支架中心体连接方式：

（a）采用有销钉段的联轴螺栓连接。推力头用螺栓固定在转子支架中心体下圆盘上［见图 2.4-30（a）］。

（b）采用键和联轴螺栓连接。推力头热套在下端轴上。该结构一般适用于转速高于 200r/min 的发电机。其结构受推力瓦尺寸（外径）制约［见图 2.4-30（b）］。

（c）采用定位销套和联轴螺栓连接。推力头用螺栓固定在转子支架中心体下圆盘上［见图 2.4-30（c）］。

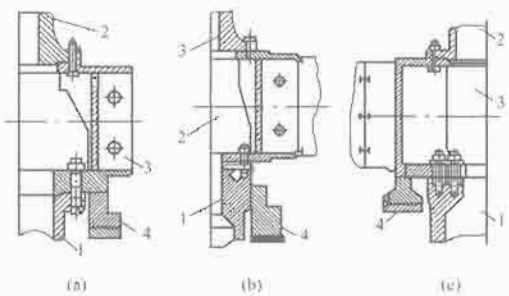


图 2.4-30 下端轴与转子支架中心体连接方式

1—下端轴；2—上端轴；3—转子支架；4—推力头

⑤用以传递扭矩的销钉段、键和定位销套，应能承受突然短路时的电磁扭矩产生的剪应力。联轴螺栓应能承受由于半数磁极短路产生的弯曲应力和重力产生的拉应力，而且必须有一定预紧力。如果销钉数量不能满足传递扭矩的需要，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

又无法布置更多销钉，可采用键来传递扭矩，且需在制造厂配制键。对定位销套和联轴螺栓的连接方式，其下端轴和转子支架的销孔应留有一定的余量，在工地待机组盘车合格后同镗。

(2) 材质

通常采用锻钢 35A、45A、20SiMn、18MnMoNb 等，锻钢应符合 JB/T1270《水轮机、水轮机发电机大轴锻件技术条件》，并按该技术条件进行探伤检查。转轴锻件一般采用整锻结构，也可采用分段锻造，然后再组焊。高转速发电机的转轴可采用高强度锻钢 34CrNi1Mo、34CrNi3Mo、25CrNi3MoV 等，锻钢应符合 JB/T1267《汽轮发电机转子锻件技术条件》。

(3) 结构尺寸

转轴内孔、法兰及法兰处轴身外径的确定：

1) 根据发电机的容量和转速算出额定扭矩 T_N，然后参照参考文献 [2] 选定法兰处轴身外径，并最终选定标准尺寸。

2) 参考已制造的容量和转速相似的转轴来确定尺寸，见表 2.4-29 和表 2.4-30。

3) 根据外径 D，选取发电机转轴法兰尺寸。

4) 转轴内孔可先初步确定一个尺寸，然后进行强度核算，并最终确定。

(4) 刚、强度计算

转轴的强度，包括转轴与转子支架热套紧量及热套配合力等采用专用程序计算。转轴的最大复合应力 $S_{max}=(S^2+3T^2)^{1/2}$ 不超过材料屈服强度的 1/4，计入应力集中因数应不超过材料屈服强度的 2/5，其中 S 是拉应力和弯曲应力的总和，T 是最大功率时扭矩产生的剪应力。转轴的最大扭转剪应力不得超过材料许用拉应力的 50%。材料许用拉应力一般为材料屈服强度的 1/3。

(5) 临界转速计算

参见本章第 3 节。

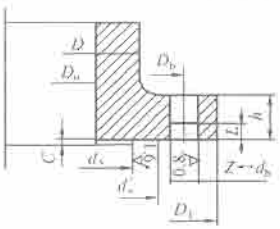
5.2.2 转子支架

支架是连接磁轭和转轴的部件，同时也是通风系统的一个压头元件。正常运行时转子支架承受扭矩、磁极和磁轭的重力、自身的离心力以及热打键（热加垫）径向配合力。对转子支架与转轴热套结构，还需承受热套引起的配合力。

表 2.4-29 典型发电机一根轴结构尺寸统计

电站名称	P_N (MW)	n_N (r/min)	T_N (N·m)	D (mm)	D_1 (mm)	D_0 (mm)	h (mm)	L (mm)	Z (mm)	d_h (mm)
邦朗	72.25	272.7	2533250	800	1270	500	170	55	16	95
大发	120	300	3824594	850	1450	320	210	80	16	115
古田	65	214.3	2900123	750	1370	300	200	70	16	105
洪石岩	20	272.7	701246	465	860	150	140	65	12	85
南梦	20	500	382459	450	865	160	115	50	12	80
瑞丽江	100	428.6	2230864	765	1370	300	200	80	14	125
三峡电源	50	272.7	1753114	800	1270	360	170	55	16	95
铁通	7.8	400	186449	400	725	240	115	45	12	68
羊湖	22.5	750	286845	400	710	100	100	20	12	66
周宁	125	428.6	2788580	765	1370	300	200	80	12	125
大七孔	16	1000	152984	410	725	100	125	45	12	68
中山包	40	500	764919	550	940	200	140	65	12	85
高洋	21	214.3	936963	600	1045	230	150	65	12	96
江口	100	214.3	4461728	900	1360	430	180	45	20	95

表 2.4-30 典型发电机下端轴结构尺寸统计



电站名称	P_N (MW)	n_N (r/min)	T_N (N·m)	D (mm)	D_1 (mm)	D_0 (mm)	h (mm)	L (mm)	Z (mm)	d_h (mm)
五强溪	240	68.2	33647450	1900	2730	1400	340	180	20	185
万家寨	180	100	17210671	1600	2330	1200	320	100	20	170
乐滩	150	62.5	22947561	1620	2380	1030	280	90	20	180
索风营	200	115.4	16571029	1500	2160	1050	270	90	20	150
百色	135	166.7	7743253	1200	1900	800	240	90	20	130
尼尔基	62.5	107.1	5579764	1100	1660	800	225	90	20	100

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

电站名称	P_N (MW)	n_N (r/min)	T_N (N·m)	D (mm)	D_1 (mm)	D_0 (mm)	h (mm)	L (mm)	Z (mm)	d_h (mm)
戈兰滩	150	142.8	10043575	1300	1940	1000	250	60	20	125
恰甫其海	80	176.5	4333817	920	1480	530	200	94	16	115
西山	54.4	107.1	4856627	1000	1600	680	210	50	20	105
洪家渡	200	200	9561484	1200	1930	850	240	90	18	155
居甫渡	95	136.4	6659391	1100	1720	800	225	70	20	115
察汗乌苏	103	272.7	3611415	800	1270	500	185	55	18	95
英布鲁	30	107.1	2678287	900	1360	700	180	45	20	95
三峡左岸	700	75	89240515	3100	4000	2650	400	123	30	200
三峡右岸	700	75	89240515	3100	4000	2650	400	123	30	200
龙滩	700	107.1	62493358	2400	3450	1770	400	100	22	225
拉西瓦	700	142.9	46837219	2300	3200	1840	350	130	20	165

(1) 结构型式及设计要求

1) 圆盘式转子支架。具有刚度大、传递扭矩大和通风损耗小等优点，目前被广泛采用。

①小容量高转速发电机采用与转轴热套在一起的圆盘式转子支架，热套紧量通过刚、强度计算确定。它由轮毂、上圆盘、下圆盘、立板和主立筋等组焊成。轮毂采用铸钢 ZG20MnSi，壁厚一般取 140～200mm，上、下圆盘和立板为 20～30mm 厚的钢板 Q345，主立筋为 100mm 厚的钢板 Q345B（见图 2.4-31）。

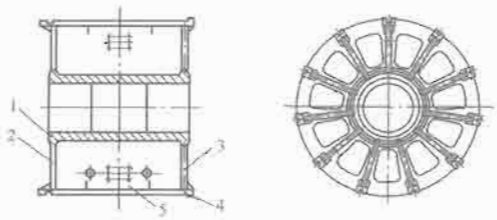


图 2.4-31 与转轴热套在一起的圆盘式转子支架

1—轮毂；2—上圆盘；3—下圆盘；4—主立筋；5—立板

②大容量低转速发电机的圆盘式转子支架由中心体和外环组件组成。受运输尺寸的限制，转子支架中心体和分瓣外环组件运到工地后组焊成整体。

③转子支架中心体由上、下圆盘和中心圆筒组成。上圆盘一般采用 100～160mm 钢板 Q345B，下圆盘的厚度约为 200～300mm，采用厚钢板 Q345B 或锻钢 20SiMn。中心圆筒采用 80～100mm 厚的钢板 Q345B 卷焊。中心体下圆盘采用凸止口与转轴连接，以防热打键止口变形而卡住转轴。

④外环组件由上、下圆板，立板，主立筋和副立筋等组成。上、下圆板采用钢板 Q345B，厚度取 30～60mm。立板采用 20～30mm 厚的钢板 Q345。主立筋由 100mm 厚的钢板 Q345B 焊接而成（见图 2.4-32），其下部挂钩应能承受磁极和磁轭重量引起的弯曲应力。对分瓣转子支架，考虑工地焊接产生的变形会影响支架与磁轭键槽的配合，通常采用工地配制副立筋或键槽板的结构。

2) 圆盘式斜立筋转子支架。支架同样由中心体和外环组件组成，但其外环组件立筋与向心线有一个夹角呈倾斜布置（见图 2.4-33）。该结构具有保持转子支架的环向稳定性和向心稳定性的能力。在热打键时能吸收一部分能量，减小立筋的刚度对热打键的影响，改善中心体的受力，使热打键时转子支架与转轴配合处变形小。斜立筋倾斜的角度通过转子支架刚、强度计算确定。

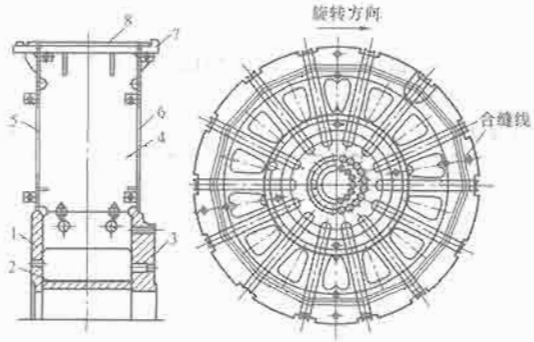


图 2.4-32 圆盘式转子支架

1—上圆盘；2—中心圆筒；3—下圆盘；4—立板；5—上圆板；6—下圆板；7—主立筋；8—副立筋

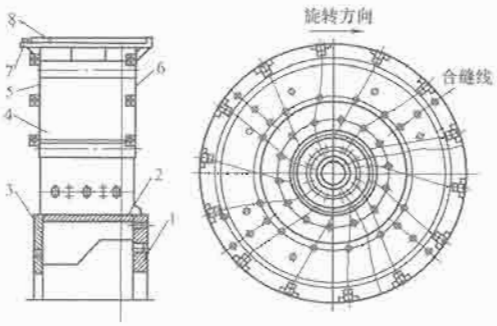


图 2.4-33 圆盘式斜立筋转子支架

1—下圆盘；2—中心圆筒；3—上圆盘；4—立板；5—上圆板；6—下圆板；7—主立筋；8—副立筋

3) 整体铸造式转子支架。常用 ZG230-400、ZG270-500 和 ZG20MnSi 铸钢整体铸造，结构紧凑、简单（见图 2.4-34）。铸造支架轮毂的厚度可取 100～140mm，应小于或等于套轴处的轴壁厚度。辐板厚度为 40～80mm，立筋厚度为 80～120mm。

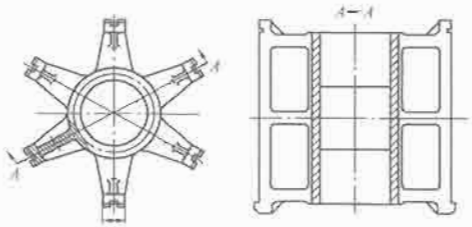


图 2.4-34 整体铸造式转子支架

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

(2) 转子支架的刚、强度计算

应用有限元专用软件计算。首先建立转子支架有限元力学模型，然后计算出磁轭热打键紧量以及打键紧量引起的径向配合力、正常运行和飞逸工况转子支架的最大应力及轴向、径向和切向刚度，参见本章第3节。

5.2.3 磁轭

发电机磁路的组成部分，也是固定磁极的结构部件。发电机的转动惯量主要由磁轭产生。磁轭承受由磁轭本身和磁极离心力产生的切向力。

(1) 结构型式

1) 钢环磁轭。由锻钢、铸钢或厚钢板热套在轴上，通过轴与磁轭的配合紧量（或紧量与键）传递扭矩（见图2.4-25）。

2) 磁轭与转轴锻成一体（见图2.4-26）。

3) 叠片磁轭。由冲片、通风槽片、拉紧螺杆、压板、磁轭键等零部件组成（见图2.4-35）。采用层间交错一定的极距并正反向叠片的方式，通过磁轭拉紧螺杆紧固成一个整体。磁轭的叠装质量可通过采用合适的补偿片（如需要）实现。通常片间压力为6～14MPa。磁轭通过热打键与转子支架相连接。

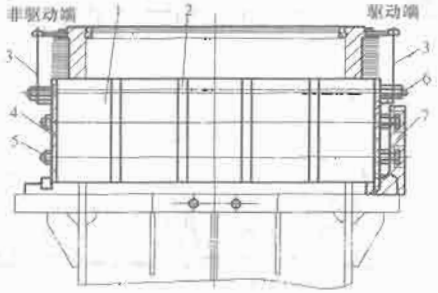


图2.4-35 磁轭装配

1—磁轭冲片；2—通风槽片；3—挡风板；4—上磁轭压板；5—磁轭拉紧螺杆；6—下磁轭压板；7—制动环

①磁轭冲片。厚度为2～6mm，采用高强度热轧钢板（见图2.4-36）。对其力学性能和电磁性能要求见表2.4-31。在飞逸转速时，磁轭和磁极的离心力在磁轭上产生的平均切向拉应力应不大于材料屈服强度的3/4～2/3。磁轭的转动惯量约占发电机转动惯量的55%～65%。磁轭冲片的弦长与每张冲片的极数、叠片方式及冲剪能力有关。通常，冲片上的拉紧螺杆孔的大小和数量与叠片方式、冲片厚度等有关，通过磁轭强度计算确定。常用的螺杆孔直径为30.3mm、36.3mm、42.3mm等。

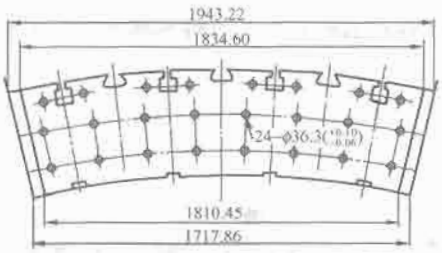


图2.4-36 磁轭冲片

②拉紧螺杆。常用的拉紧螺杆直径为30mm、36mm、42mm等，尺寸允许偏差级别为h8～h11。螺杆材料为45冷拉圆钢或42CrMo、35CrMo调质圆钢。

表2.4-31 磁轭冲片的力学性能和电磁性能

力学性能			电磁性能	
δ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ_s (%)	B_{50} (T)	B_{100} (T)
≥235	≥350	≥24	≥1.60	≥1.64
≥345	≥450	≥20	≥1.59	≥1.64
≥450	≥550	≥17	≥1.54	≥1.64
≥490	≥590	≥15	≥1.54	≥1.64
≥550	≥650	≥14	≥1.54	≥1.63
≥600	≥700	≥13	≥1.54	≥1.62
≥700	700～900	≥10	≥1.50	
≥700	≥750	≥13	≥1.50	

③叠片方式。磁轭的叠片方式直接影响磁轭的切向拉应力、拉紧螺杆的剪应力以及发电机的冷却风量。应对磁轭的不同叠片方式（每片磁轭的极数、相邻冲片错开的极距等）、通风效果（通风隙的数量、冷却风量）以及冲片的材质（切向拉应力）等进行综合分析比较，以便获得最经济、安全、可靠的叠片方式。图2.4-37中分别给出磁轭每片3个极、层间相错1/2个极距及层间相错1个极距的叠片方式示例。扇形磁轭冲片的叠片方式详见参考文献[2]。

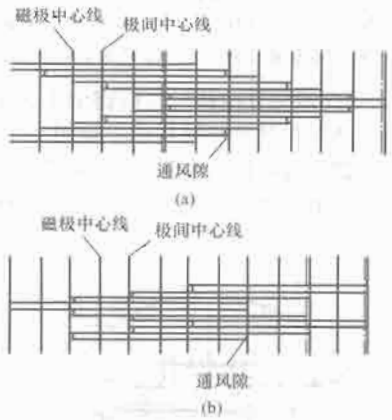


图2.4-37 每片3个极的叠片方式

(a) 层间相错1/2个极距；(b) 层间相错1个极距

(2) 磁轭与转子支架的连接

磁轭与转子支架采用径向键或径向、切向复合键（同槽）或径向、切向键分开布置的连接方式。为满足在正常或非正常运行工况，磁轭与转子支架保持同心，可采用冷打键和热打键的安装工艺实现。磁轭键采用35或45锻钢经正火和回火处理后加工而成。其斜度为1∶200。

1) 径向键结构。适用于高转速、大容量、整体磁轭或叠片磁轭的发电电动机（见图2.4-38）。对于前者其分离转速（浮动转速）通常取为额定转速的0.9～1.0倍；而后者则为1.05～1.1倍。一些高转速、中小容量、整体磁轭或叠片磁轭的常规发电机也采用这种结构，但其分离转速取额定转速的1.15～1.35倍。

2) 径向、切向（同槽）复合键结构。径向键为凸键，采用垫片调节热打键紧量。磁轭与支架的分离转速取1.15～1.4倍的额定转速。切向键为2个小键，它可补偿支架立筋键槽与磁轭对应键槽之间的偏差（见图2.4-39）。该连接结构能保证转子在正常和非正常运行工况的圆度和同心度，适用于中、低转速大容量的直支臂或斜支臂的圆盘式转子支架。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

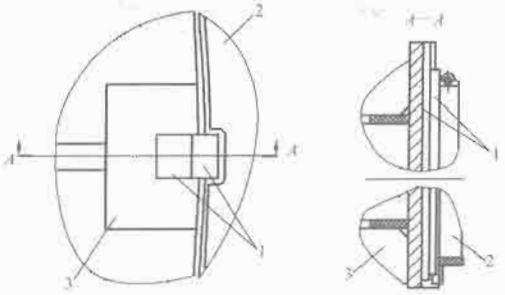


图 2.4-38 径向键结构
1—磁轭键；2—磁轭；3—转子支架主立筋

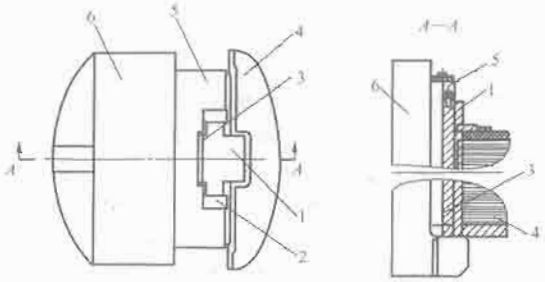


图 2.4-39 径向、切向（同槽）复合键结构
1—磁轭凸键；2—切向键；3—垫片；4—磁轭；
5—转子支架副立筋；6—转子支架主立筋

3）径向、切向键分开结构。径向键位于转子支架立筋处，由弹性键、垫板和2个小键组成（见图2.4-40）。沿轴向布置若干个小键，通过打紧小键使弹性键产生变形从而形成紧量。切向键布置在另一个键槽内，由凸键和2个小键组成。

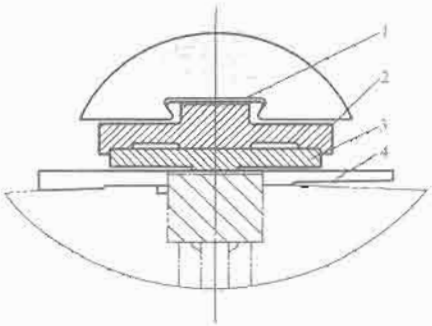


图 2.4-40 径向、切向键分开结构
1—垫板；2—弹性键；3—垫板；4—小键

5.2.4 磁极

通常为凸极结构，是产生直流励磁主磁场的重要部件，由磁极铁心、磁极线圈和阻尼绕组等部件组成（见图2.4-41）。磁极铁心的尺寸、磁极线圈的匝数和线规、阻尼条的直径和数量等由电磁设计确定。

（1）磁极与磁轭的连接方式

磁极与磁轭采用T尾或鸽尾通过磁极键连接在一起。可通过垫片调整定、转子气隙。常用的连接方式有以下几种：

1）T尾连接。磁极键贯通整个磁极，结构简单，广泛应用于大、中容量的水轮发电机。磁极键的材质为经正火和回火处理的35或45锻钢，其斜率为1∶200，成对加工并打配对标记（见图2.4-42）。

2）T尾连接。在磁极两端各打入一对短键，可在磁极和磁轭之间加垫片调整定、转子气隙，适用于大容量、长磁极铁心的水轮发电机（见图2.4-43）。

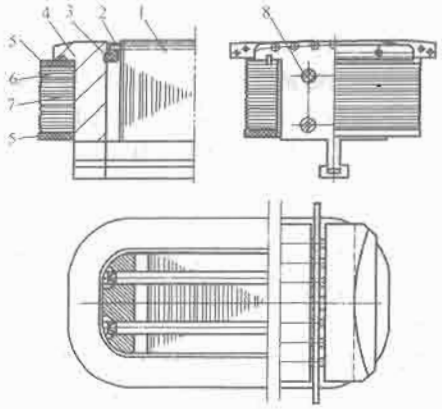


图 2.4-41 磁极装配
1—磁极铁心；2—阻尼条；3—阻尼环；4—磁极压板；
5—磁极托板；6—磁极线圈；7—极身绝缘；8—拉紧螺杆



图 2.4-42 T尾连接结构
1—驱动键；2—固定键；3—顶丝

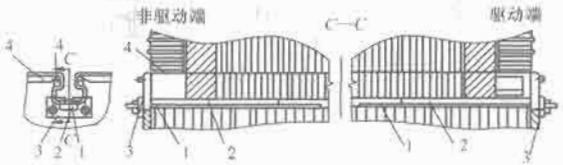


图 2.4-43 T尾连接结构
1—驱动键；2—固定键；3—固定板；4—垫片

3）鸽尾连接。鸽尾侧部打键。对长磁极铁心，可打入锯齿型键。由于鸽尾槽径向尺寸较短，广泛应用于磁轭应力较高的发电机。鸽尾槽比T尾槽易加工，整体磁轭也常采用鸽尾槽（见图2.4-44）。

4）鸽尾连接。在磁极两端各打入一对短键，适用于长磁极铁心的水轮发电机（见图2.4-45）。

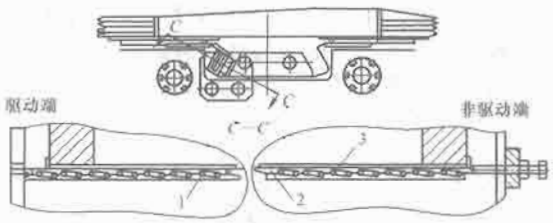


图 2.4-44 鸽尾连接结构（一）
1—驱动键；2—固定键；3—垫片

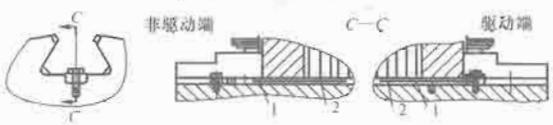


图 2.4-45 鸽尾连接结构（二）
1—驱动键；2—固定键

（2）磁极铁心

有实心磁极和叠片磁极两种结构。按铁心截面几何形状

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

可分为矩形和梯形（向心磁极）。

1）为满足机械强度的要求，高转速发电机（n_N>750 r/min），可采用由整体锻钢制成的实心磁极铁心。由于它具有较好的阻尼作用，可不设阻尼绕组。为减小由于极靴表面损耗产生的热量，可在极靴表面沿周向加工散热沟。

2）矩形磁极线圈在运行时产生的离心力可分解出一个侧向分量（见图2.4-46）。为使此分量等于或接近于零，可采用向心磁极（磁极线圈向心布置）。其优点是不必装设磁极线圈支撑，有利于轴向通风。高转速、大容量发电机（含发电电动机）广泛采用向心磁极（见图2.4-47）。



图2.4-46 磁极线圈受力示意

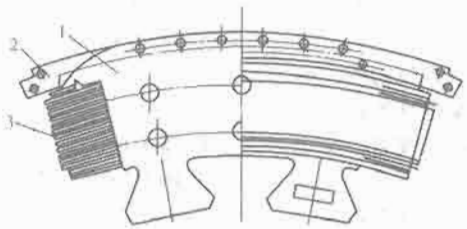


图2.4-47 向心磁极装配

1—磁极铁心；2—阻尼绕组；3—磁极线圈

3）叠片磁极铁心由冲片、压板、拉紧螺杆等部件组成。磁极冲片冲制后须去毛刺。尽管这样，冲片还会有不可避免的表面不平度，很多冲片叠在一起，就会产生明显的扭曲和不平。铁心的叠装质量可通过采用合适的补偿片（如需要）实现（消除扭曲和不平）。并通过磁极压板和拉紧螺杆压成一个坚固的整体。根据经验，磁极铁心片间压力约为2.5～4.5MPa。磁极拉紧螺杆可焊在磁极压板上，也可用螺栓固定在压板上（见图2.4-48）。

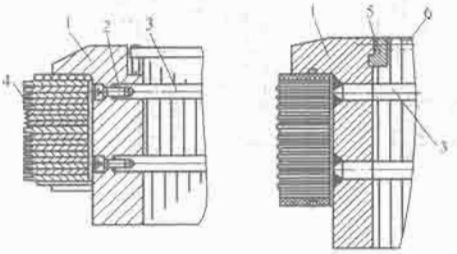


图2.4-48 磁极装配

1—磁极压板；2—螺栓；3—拉紧螺杆；
4—磁极线圈；5—阻尼环；6—阻尼条

①磁极冲片。

（a）采用1.5～3mm厚的冷轧钢板冲制而成（见图2.4-49）。对其力学性能和电磁性能要求见表2.4-32。磁极冲片的主要尺寸由电磁设计确定。T尾或鸽尾的数量和尺寸通过磁极和磁轭的机械计算确定。拉紧螺杆孔的数量视磁极冲片的面积而定，一般为4个或6个。大容量、高转速发电机的磁极冲片一般为6个螺杆孔。通常孔的面积与冲片面积之比约为0.03～0.05。

（b）应计算磁极T尾或鸽尾的拉应力、剪应力及极靴的弯曲应力，其值不大于材料的失稳强度。为提高磁极的刚度，通常在T尾（鸽尾）和极靴开有1道或2道直径为3mm的沟槽，铁心叠压后再满焊。

表2.4-32 磁极冲片的力学性能和电磁性能

力学性能			电磁性能
σ_s（MPa）	σ_b（MPa）	δ_s（%）	B_{50}（T）
≥250	≥390	≥22	≥1.69
≥300	≥400	≥20	≥1.59
≥350	≥450	≥20	≥1.59
≥400	≥450	≥10	≥1.50

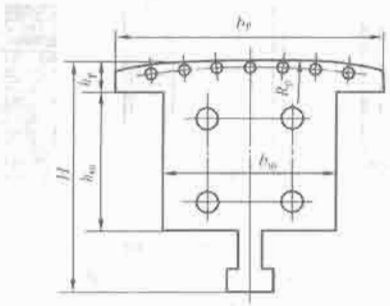


图2.4-49 磁极冲片

②磁极压板。

（a）压板的尺寸及计算内容与磁极冲片的相同。它不仅承受本身的离心力作用，还要承受其范围内磁极线圈和阻尼绕组的离心力作用。压板的计算应力值应不大于材料屈服强度的2/3。

（b）压板采用D20Mn、34CrNi1Mo整体锻造或用Q235、Q345B钢板焊接而成。压板的厚度应根据强度计算确定。

③磁极线圈。采用纯扁铜排绕制或四角焊接而成。铜排的材质为T2，铜含量达99.90%（质量分数）。绕制的磁极线圈选用软铜母线TMR，采用四角焊接的选用硬铜母线TMY2。为增加线圈的散热表面，采用五边形、七边形或其他形状的铜母线（见图2.4-50），或用矩形铜母线绕制出散热匝，或是用不同宽度的矩形铜母线焊接出具有散热匝的磁极线圈（见图2.4-51）。磁极线圈匝间设有绝缘，其厚度为0.2～0.4mm。线圈上下部设有环氧玻璃布层压板加工或整体压制而成的绝缘托板。厚度为6～15mm。磁极线圈与磁极极身之间设有极身绝缘，厚度为1mm。极身绝缘与线圈之间的间隙可用环氧玻璃布层压板和浸制的涤纶毡填充。为防止托板与极身绝缘搭接处产生爬电，此处设有L形绝缘（见图2.4-52）。磁极线圈下部采用钢板焊接或用注胶玻璃丝绳固定在磁极极身上。

④磁极线圈之间连接。线圈之间的连接结构可根据电机

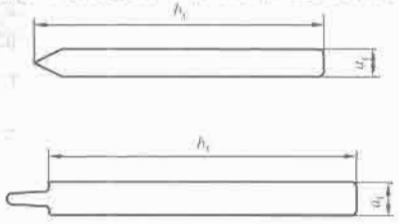


图2.4-50 磁极线圈采用铜排焊接

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

的容量、转速以及转子结构等选择（见图 2.4-53）。铜排连接的接触电流密度一般约取 0.2A/mm²。极间连接应可靠、简单、方便（见图 2.4-54）。图 2.4-54（a）～（e）所示适用于低速电机，图 2.4-54（f）～（h）所示适用于高速电机。

⑤磁极线圈与集电环之间连接。选用软铜母线 TMR 连接。其电流密度一般取 2A/mm²，而接触电密约取 0.2A/mm²。

⑥磁极线圈支撑。矩形磁极线圈在运行时产生的离心力可分解出一个侧向分量（见图 2.4-46）。为防止在这个侧向分量作用下，线圈产生有害变形，磁极线圈需装设支撑结构（见图 2.4-55）。大容量发电机的磁极线圈支撑应在不吊出转子情况下便于更换磁极。

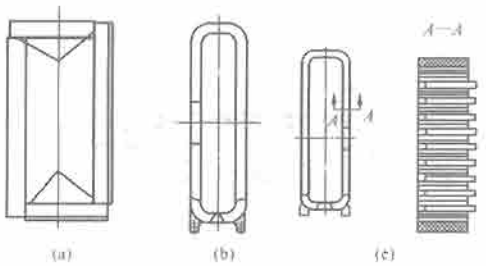


图 2.4-51 磁极线圈

（a）四角焊接线圈；（b）绕制线圈；
（c）绕制出散热层的线圈

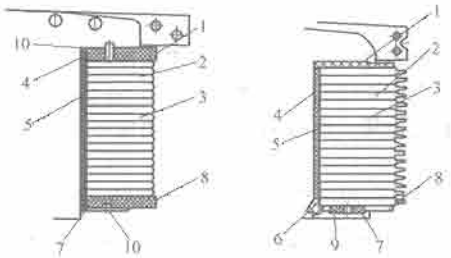


图 2.4-52 磁极线圈绝缘

1—上绝缘托板；2—铜排；3—匝间绝缘；
4—L 型绝缘；5—极身绝缘；6—注胶玻璃丝绳；
7—铁托板；8—下绝缘托板；9—碟形弹簧；10—绝缘销

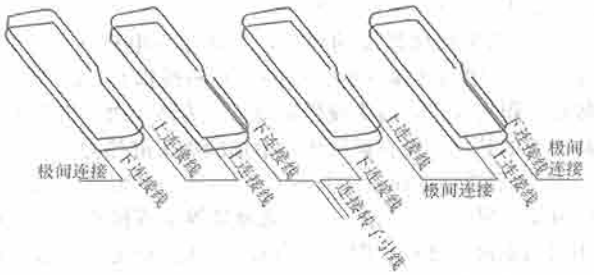


图 2.4-53 磁极线圈连接示意

⑦阻尼绕组。

（a）水轮发电机一般应具有完整的交、直轴阻尼绕组，包括阻尼条、阻尼环和阻尼环连接片等。阻尼条和阻尼环采用钎焊焊牢，环间连接片的连接处刷镀银，并用螺栓固紧。为防止离心力使阻尼绕组变形或损坏，应采取措施（拉杆）将其固定。

（b）阻尼条的直径和数量由电磁设计确定。阻尼环的截面一般为一个磁极上阻尼条总截面的 1/3～1/2。有关阻尼绕组的性能计算参见本章第 3 节。

5.2.5 集电装置

将励磁电流从静止的电刷传到旋转的转子线圈上，由集电环装置和电刷装置组成。集电环通过支撑固定在转轴、推力头等转动部件上，采用电缆或铜排与磁极线圈连接。电刷装置固定在顶罩内或上机架下部。

（1）集电环装置

由集电环支撑、集电环及螺杆等组成。集电环由钢板 Q235 或锻钢 20SiMn 制成。对高转速发电机，为增加散热面积，在集电环外表面加工出螺旋槽。对更高转速发电机，如 $n_N \geqslant 750$r/min，应考虑装设风扇增强散热。集电环支撑采用整体铸造或钢板焊接结构，通过键与转轴套在一起或用螺栓和止口固定在转轴上（见图 2.4-56）。

（2）电刷装置

由导电环、导电杆、刷握、电刷等部件组成。导电环用钢板 Q235 加工而成。加工后表面应镀锌。导电环的厚度和环宽、导电杆的直径应根据电流密度和刷握尺寸确定。一般电流密度选择为 0.05～0.06A/mm²，导电环的电流密度为 1.5A/mm²。励磁电缆通过接头固定在导电环上，电刷和电

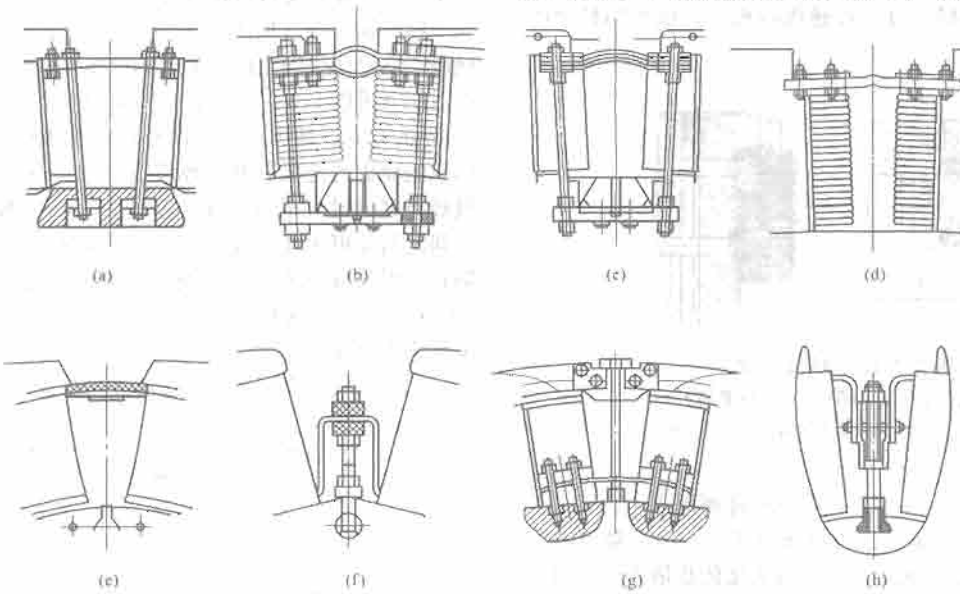


图 2.4-54 磁极线圈连接

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

缆接头的数量必须大于2个。励磁电缆的电流密度为1.7～1.95A/mm²。对大容量水轮发电机，应特别注意励磁电缆与导电环的连接，使励磁电流分路流入电刷。为防止机组运行中，电刷与集电环摩擦产生的炭粉污染定、转子等部件，可增设吸尘装置（见图2.4-57）。

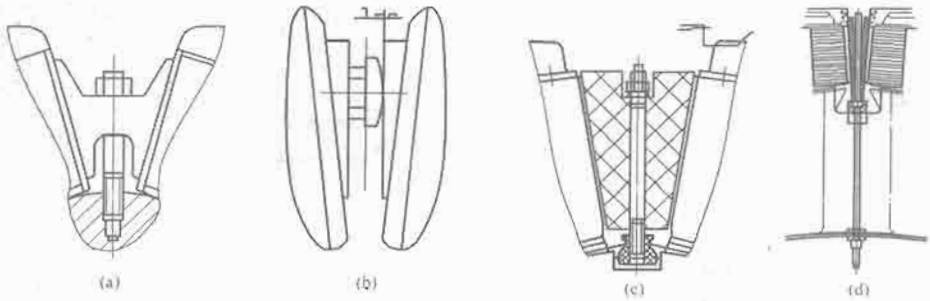


图2.4-55 磁极线圈支撑

(a) 螺钉固定；(b) 螺杆支撑；(c) 螺钉固定；(d) 长穿轭螺杆固定

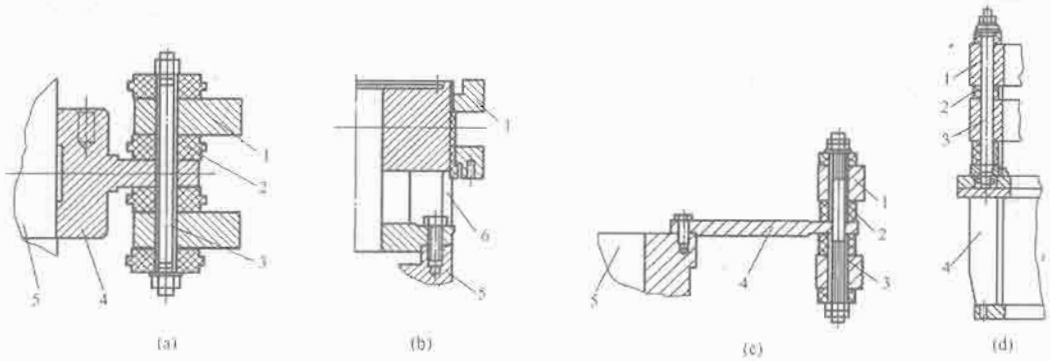


图2.4-56 集电环装置

1—集电环；2—绝缘块；3—绝缘螺杆；4—集电环支撑；5—转轴；6—集电环轴

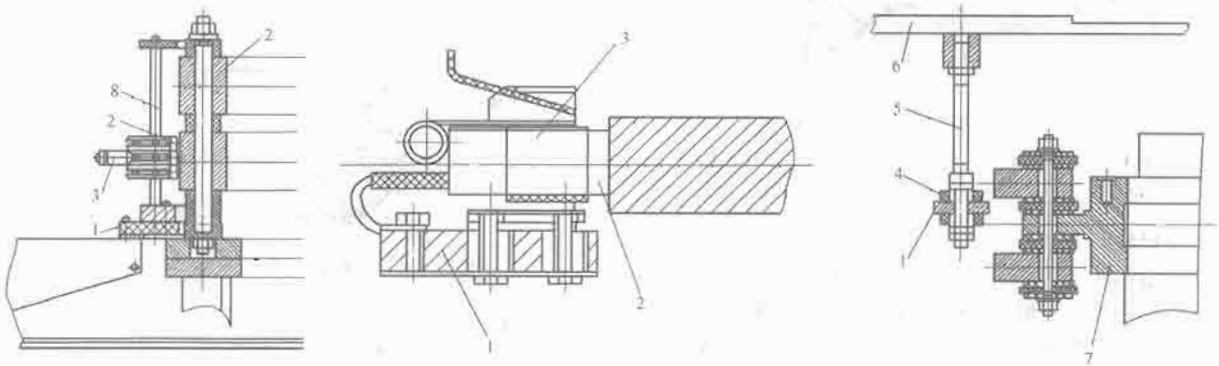


图2.4-57 电刷装置

1—导电环；2—电刷；3—刷握；4—绝缘垫；5—螺杆；6—顶罩；7—集电环装置；8—导电杆

5.3 机架

水轮发电机的一个重要结构部件，主要用于支撑推力轴承、导轴承和制动器等部件，并承受水轮发电机的径向力和推力负荷（承重机架）。

5.3.1 结构型式与分类

机架的结构型式通常由水轮发电机的总体布置、发电机结构尺寸、机架负荷、运输条件和具体项目的特殊要求等因素确定。一般由一个中心体和若干个支臂组成，为钢板焊接结构。根据运输条件，可分为中心体和支臂在制造厂内整体焊接（见图2.4-58）、工地组焊（见图2.4-59）和合缝板组合结构（见图2.4-60）。目前极少采用合缝板组合结构。

(1) 上机架

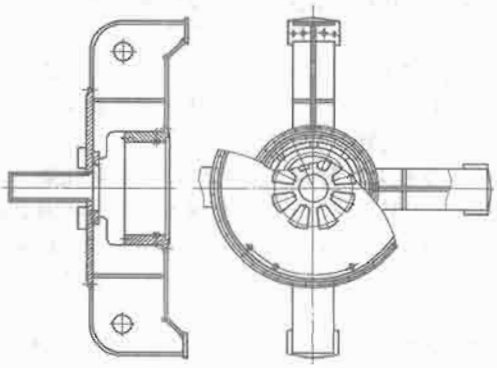


图2.4-58 悬式发电机辐射型上机架

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

位于发电机转子上部的机架统称为上机架。其轴向与定子机座连接，而径向一般通过千斤顶或基础板与基础连接。根据刚、强度计算要求，有些小型发电机的上机架与基础无径向连接。

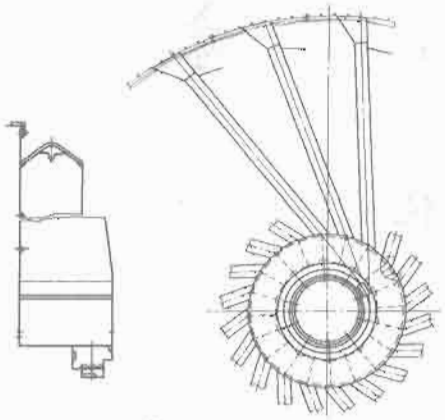


图 2.4-59 半伞式发电机斜支臂上机架

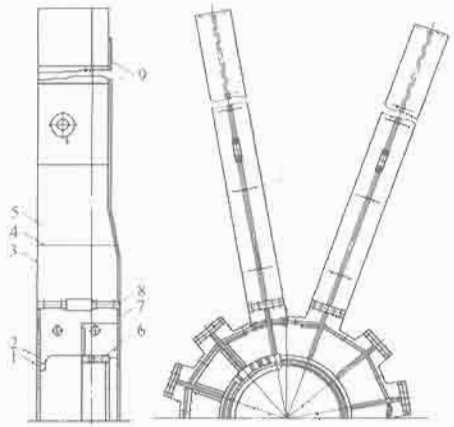


图 2.4-60 半伞式发电机辐射型上机架

1—加强圈；2—上圆板；3—上翼板；4—筋板；5—立筋；6—座圈；7—下圆板；8—合缝板；9—垫板

(2) 下机架

位于发电机转子下部的机架统称为下机架。其轴向通过基础板与基础连接，一般与基础无径向连接。根据刚、强度计算要求，有些中大型发电机的下机架需通过千斤顶或基础板与基础径向连接。

(3) 承重机架

1) 承受推力负荷的机架统称为承重机架。它承受机组转动部分重量、水轮机轴向水推力、机架自重和作用在机架上的其他负荷。另外，根据机组临界转速计算需要，有的承重机架内也装设导轴承，承受径向负荷。

2) 悬式发电机的上机架（见图 2.4-58）、伞式和半伞式发电机的下机架（见图 2.4-61）都属于承重机架。

(4) 非承重机架

1) 不承受推力负荷的机架统称为非承重机架。一般只放置导轴承，主要承受转子径向机械不平衡力和因定转子气隙不均匀而产生的单边磁拉力。悬式发电机的下机架（见图 2.4-62）、伞式和半伞式发电机的上机架（见图 2.4-59）都属于非承重机架。

2) 根据机架支臂结构型式可分为辐射型（见图 2.4-58、图 2.4-60 和图 2.4-62）、井字型（见图 2.4-63）、八卦型（见图 2.4-64）和斜支臂型（见图 2.4-59 和图 2.4-61）。

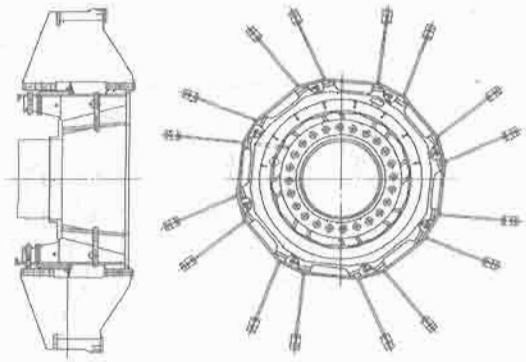


图 2.4-61 半伞式发电机斜支臂下机架

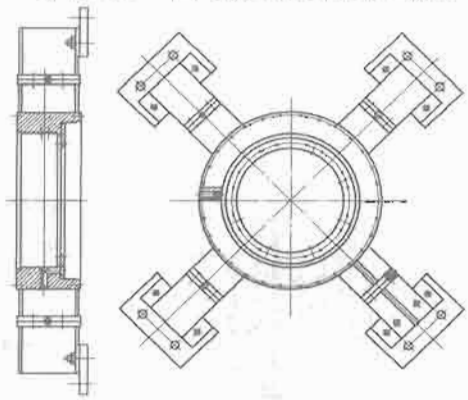


图 2.4-62 悬式发电机辐射型下机架

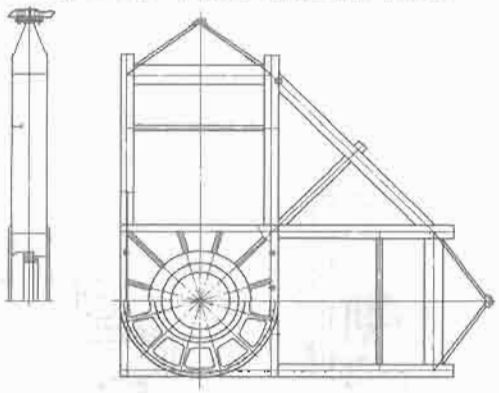


图 2.4-63 半伞式发电机井字型上机架

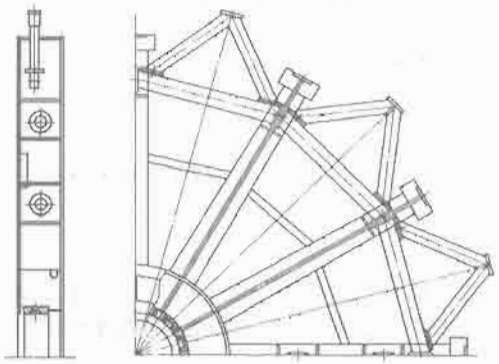


图 2.4-64 半伞式发电机八卦型上机架

5.3.2 主要结构部件

(1) 中心体

由上圆板、下圆板、立筋板和座圈（设有导轴承的机架）等部件焊接而成，呈圆形或多边形。根据推力轴承和导轴承的布置，典型中心体结构分别如图 2.4-65、图 2.4-66 和图 2.4-67 所示。

(2) 支臂

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

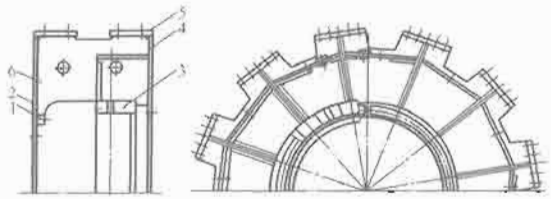


图 2.4-65 装有导轴承的机架中心体（一）
1—加强圈；2—上圆板；3—座圈；4—下圆板；
5—合缝板；6—筋板

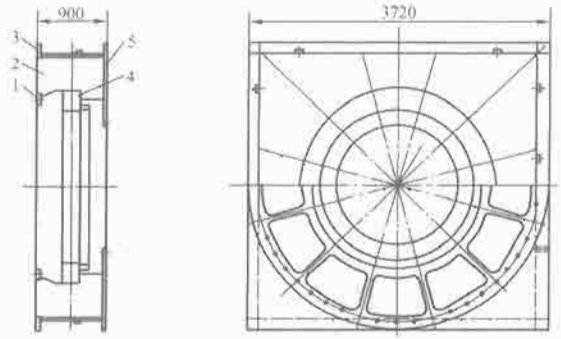


图 2.4-66 装有导轴承的机架中心体（二）
1—加强圈；2—筋板；3—上圆板；4—座圈；5—下圆板

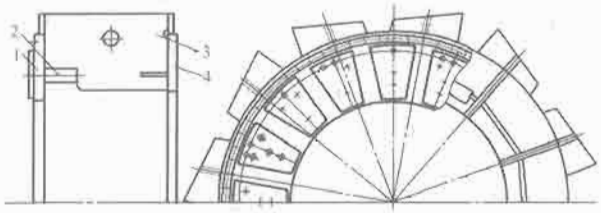


图 2.4-67 无导轴承的机架中心体
1—上圆板；2—加强圈；3—筋板；4—下圆板

一般由上翼板、下翼板和立筋板等部件焊接而成，呈工字型或盒型。典型支臂结构如图 2.4-68 和图 2.4-69 所示。

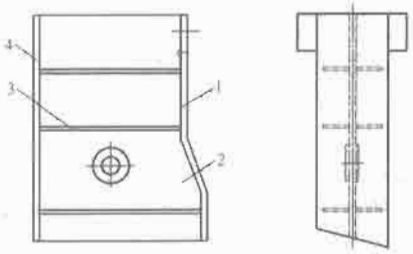


图 2.4-68 机架支臂（一）
1—上翼板；2—立筋；3—筋板；4—下翼板

（3）合缝板

一般为 30～120mm 厚的钢板。合缝面需加工，并用合缝螺栓紧固。为方便支臂和中心体连接，合缝板采用圆柱销、键和凸台止口等方式定位。

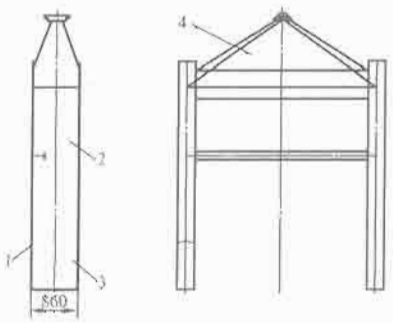


图 2.4-69 机架支臂（二）
1—上翼板；2—立筋；3—下翼板；4—机架支腿

5.3.3 设计要点

（1）辐射型结构

支臂向心布置，结构受力均匀，刚性好，将导轴承径向力直接传到定子或基础。根据实际需要，为减小机架和导轴承的径向振动，常在机架支臂末端装设千斤顶。同时为保证在发电机半数磁极短路时基础不被破坏，一般在千斤顶上装设剪断销。该结构广泛应用于水轮发电机的上、下机架。

（2）井字型结构

支臂呈“井”字型布置，共 8 个支臂，每 2 个一组，每组支臂末端与基础切向连接，共 4 点连接。该结构能有效地将导轴承对基础的径向力转换为切向力，适用于大中型中、低转速发电机的非承重机架。

（3）八卦型结构

支臂与基础为 6 点、8 点或 12 点连接，支臂间用筋板周向连接，系井字型的派生结构，适用于大中型中、低转速发电机的非承重机架。

（4）斜支臂结构

支臂非向心、而是倾斜一定的角度布置。该结构能有效地适应发电机定子和机架本身的热膨胀，并吸收热变形，适用于大型和巨型发电机的上、下机架。

承重机架的轴向挠度允许值推荐按表 2.4-33 选取。

表 2.4-33 负荷机架轴向挠度允许限值

推力负荷（MN）	挠度值（mm）
≤5	0.5～1.5
5～10	1.5～2.0
10～15	2.0～2.5
15～35	2.5～3.0
35～55	3.0～3.5

注 对推力负荷大者取上限值。

典型水轮发电机机架的主要技术数据见表 2.4-34。

表 2.4-34 典型水轮发电机机架主要技术数据

序号	电站名称 发电机型号	中心体		支臂			总负荷（t）	总挠度（mm）	机架最大应力（MPa）	机架固有频率（Hz）	结构型式
		对边尺寸（mm）	高度（mm）	支臂数	高度（mm）	对边尺寸（mm）					
1	三峡右岸 SF700-80/19760	6000	1875	20	1245/1855	23380	—	—	—	—	斜支臂型上机架
2	三峡右岸 SF700-80/19760	7967	4950	12	1995/3195	15600	5560	3.32	121	11.67	辐射型下机架
3	三峡左岸 SF700-80/19720	8560	4650	16	2373/4700	15040	5520	3.47	140	9	斜支臂型下机架

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

序号	电站名称 发电机型号	中心体		支臂			总负荷 (t)	总挠度 (mm)	机架最大应力 (MPa)	机架固有频率 (Hz)	结构型式
		对边尺寸 (mm)	高度 (mm)	支臂数	高度 (mm)	对边尺寸 (mm)					
4	水布垭 SF400-40/11900	3870	954	12	930/930	15410	—	—	—	—	八卦型上机架
5	三板溪 SF250-36/10200	3720	900	8	860/860	13900	—	—	—	—	井字型上机架
6	三板溪 SF250-36/10200	6412	1710	6	1630/1630	8250	1470	2.15	95	14.21	辐射型下机架
7	索风营 SF200-52/13600	3750	840	8	800/800	16360	—	—	—	—	井字型上机架
8	索风营 SF200-52/13600	2600	1800 (3050)	8	1755/1755	10860	1650	2.82	168	12.39	辐射型下机架
9	百色 SF135-36/9200	3650	840	8	800/800	11860	—	—	—	—	井字型上机架
10	百色 SF135-36/9200	4920	1460 (2290)	6	1420/1420	6610	940	2.09	86	16.12	辐射型下机架
11	三峡电源 SF50-22/5620	3600	1250	6	1080/1180	7800	400	1.39	81	18.42	辐射型上机架
12	三峡电源 SF50-22/5620	2000	670	6	535/535	4500	—	—	—	—	辐射型下机架

5.3.4 刚、强度计算

机架的刚、强度计算及其应力控制值参见本章第 3 节。

5.4 推力轴承

1）推力轴承是水轮发电机最重要的机械部件，支撑着机组的全部轴向负荷。其设计和制造技术直接影响水轮发电机组的可靠运行。推力轴承的承载能力已从 70kN 发展到 60000kN 级的水平。图 2.4-70 所示为推力轴承负荷的增长情况。

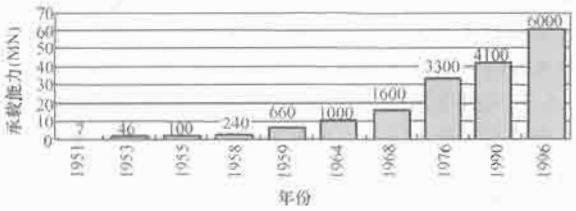


图 2.4-70 推力轴承负荷增长统计

2）推力轴承技术涉及多学科的领域，提高其运行可靠性和安全性的途径：一是进行热弹流理论分析和计算；二是真机试验或试验台试验；三是前两者的结合。经验证明计算和试验相结合是可靠的方法。随着热弹流计算程序的发展和完善，以及设计、制造、安装和运行等经验积累，可提供安全可靠的新型大负荷推力轴承。

3）推力轴承向高速、重载方向发展。支撑结构多采用小弹簧簇、双托盘弹性梁、弹性油箱以及支柱螺杆托盘支撑小支柱等，润滑冷却多采用自泵式或外加泵外循环冷却方式或内循环冷却方式。

5.4.1 主要参数设计及选择

推力轴承瓦面油膜的不等温、不等压性及瓦和镜板的热弹变形是大型水轮发电机推力轴承的运行特点（详见参考文献 [3]。油膜温度、油膜压力和油膜厚度这 3 个重要参数取决于负荷、转速、瓦面进油温度、油黏度、瓦尺寸大小、几何形状、镜板工作面的平面度、瓦面及镜板面的热弹变形等。一般情况下，根据负荷和转速进行推力轴承设计。

（1）巴氏合金瓦推力轴承

1）瓦内径。根据大轴的直径和挡油管的安装和运行空间确定。

2）外半径 R_o 与内半径 R_i 之差为瓦宽 B，即 $B=R_o-R_i$。圆周方向瓦面弧长为瓦长 L，以长宽比 L/B 表征瓦面的几何形状。L/B 可在 0.5～1.0 范围内选取。L/B 大，瓦的温升高。

3）瓦的总长与平均直径的周长之比称为填充系数 k。该值大，则间距小，由前一块瓦流出的热油将有相当多的部分进入下一块瓦，进油温度增高，影响瓦的承载能力。填充系数小，则间距大，相当于缩小瓦面积，单位压力增大，对轴承运行也不利。选取适当的间隙对轴承设计显得很重要，推荐 k 取约 0.8。

4）瓦的厚度。可取瓦宽 B 的 1/3 左右。

5）线速度。主要影响摩擦和搅拌功耗，在能够建立完全的轴承动压油膜情况下，减小瓦的直径，降低线速度，有利于降低功耗，减小热变形。

6）瓦的平均单位压力 p（MPa），$2.0<p<5.0$。中、小型推力轴承，宜取下限值。支柱螺杆托盘支撑小支柱双层瓦大型推力轴承，其单位压力取较大值，$4.0<p<7.0$。

7）瓦的周向偏心率 e。对双向推力轴承，$e=0$。单向推力轴承，$6\%\leqslant e\leqslant 10\%$。在此范围内轴承的性能可有效发挥，承载能力达到极大值。

8）瓦的支承分布直径 D_s。可根据瓦的内径 D_i 和外径 D_o 确定

$$D_s=2\ (D_o^3-D_i^3)\ /\ [3\ (D_o^2-D_i^2)] \qquad (2.4\text{-}20)$$

9）油槽油量。可根据轴承的损耗确定，还应考虑冷却循环系统断水 10～15min 的要求。

10）供油温度。轴承的供油温度一般可通过冷却循环系统得到有效控制。降低进油温度有利于提高轴承的润滑性能。

11）瓦的温度。GB/T 7894—2001 对巴氏合金瓦推力轴承瓦温度限值规定为 75℃。瓦体温度监测传感器的位置一般位于径向和周向长度均为约 75%处，该测点基本位于瓦的高温区。瓦监测温度与最高瓦面温度一般相差 5～10K，瓦温度限值可定为 80℃。

12）最小油膜厚度。$h_{min}>20\sim30\mu m$，小负荷推力轴承取下限值。

13）瓦面最大压力与平均压力之比体现了瓦面和镜板面的综合变形值，该值一般为 2～4。比值越大，其综合变形越大。比值为 2～3 比较合理。当瓦面为平面时，油膜压力比较平缓，峰值压力与平均压力之比 p_{max}/p_m 一般约 2.5。在油膜压力和油膜温度联合作用下，瓦面和镜板面会发生变形，进而影响油膜厚度分布。对于重载大型推力轴承，如瓦面和镜板面的综合变形过大，就可能发生磨损和烧瓦。

（2）弹性金属塑料瓦推力轴承

1）把成型的 8～10mm 厚的复合层铅焊到钢板瓦基上。复合层为螺旋形青铜丝和聚四氟乙烯用压力成型的金属塑料复合材料，氟塑料层的厚度为 2～3mm。金属丝层可起聚四

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

氟乙烯和瓦基钢板连接作用。复合层具有一定弹性，改善推力轴承的运行性能（详见参考文献[4]）。

2）弹性金属塑料瓦推力轴承的参数设计及选择与巴氏合金瓦推力轴承的基本相同，不同点为：

①瓦的平均单位压力 p（MPa）。$2.0<p\leq7.0$，对中、小型推力轴承，宜取下限值。

②瓦的温度。温度监测传感器的相对位置同巴氏合金瓦推力轴承，瓦监测温度与最高瓦面温度一般相差10～30K。油温度限值可定为50℃，瓦温度限值可定为55～60℃，瓦面温度限值可定为90℃。

③塑料瓦面形状设计。聚四氟乙烯为热塑性材料，在外力作用下，会产生一定的永久变形，其值与外力大小和外力的作用时间有关。塑料瓦复合层的应力-应变关系为非线性，随温度的不同有较大差异。且应力-应变关系随复合层厚度及成型工艺不同而存在差异。进行推力轴承热弹流计算时，要考虑上述特性。

瓦面形线根据推力轴承变形确定，进油边的楔形坡口的厚度一般为 $\delta_1=0.10\sim0.15$mm，出油边的楔形坡口的厚度一般为 $\delta_2=0.05\sim0.10$mm，如图2.4-71所示。

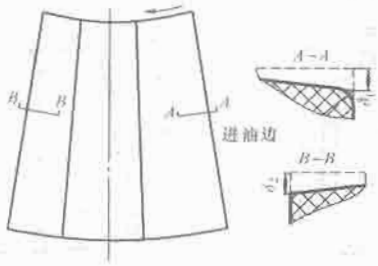


图2.4-71 塑料瓦瓦面形线

（3）推力轴承特性

1）镜板在力载荷作用下，周向变形的高点处在瓦上，低点在瓦间，径向变形为外径侧上翘。镜板在温度载荷作用下，周向由于恒温而不产生变形，径向变形为下凸。镜板面的综合变形为径向下凸，外径侧上翘，沿周向为波浪形，如图2.4-72所示。

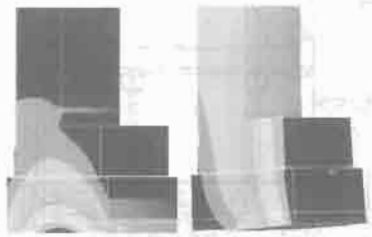


图2.4-72 镜板推力的温度分布和变形

2）热、弹性变形使巴氏合金瓦推力轴承的瓦面产生凸变形，如图2.4-73所示。对小支柱巴氏合金瓦推力轴承，由于小支柱的影响而使瓦面产生径向凹变形（详见参考文献[5]），部分补偿瓦和镜板的热弹变形，该瓦的承载能力大，如图2.4-74所示。

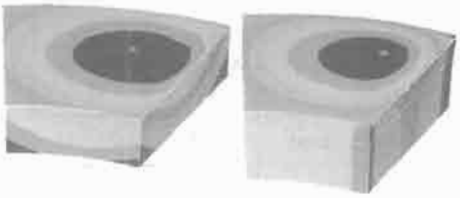


图2.4-73 巴氏合金瓦变形

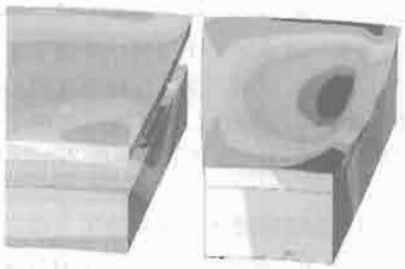


图2.4-74 小支柱推力瓦和塑料瓦变形

3）塑料瓦的瓦面凹变形较大，这是由于其复合层的压缩模量较小所致，如图2.4-74所示。塑料层的绝热性极大降低瓦体的温度，较好地抑制瓦的热变形。塑料层的弹性还可部分补偿轴瓦和镜板的热弹变形，进而改善油膜厚度分布。这是塑料瓦推力轴承承载能力大的主要原因。

（4）典型推力轴承

三峡、龙滩、拉西瓦、小湾等700MW级发电机采用小支柱支撑的双层巴氏合金瓦推力轴承和外循环润滑冷却。水口发电机40000kN级双层巴氏合金瓦推力轴承采用弹性梁双托盘支撑结构和内循环润滑冷却。葛洲坝、岩滩、五强溪、小浪底等发电机推力轴承采用弹性金属塑料瓦与弹性油箱相匹配的支撑结构及内循环润滑冷却系统。典型发电机推力轴承的主要技术数据见表2.4-35。

5.4.2 高压油顶起系统

其作用是减小起动时的摩擦系数，缩短起动时间，而且便于安装时对机组进行盘车。

1）大中型水轮发电机巴氏合金瓦推力轴承装设高压油顶起系统。该系统在机组起、停过程中投入运行。

表2.4-35 典型推力轴承主要技术数据

电站名称	三峡左岸	龙滩	拉西瓦	小湾	水口	葛洲坝	岩滩	五强溪	小浪底
装机台数	8	7	6	6	7	13	4	5	6
额定（最大）容量（MVA）	840	777.8	757	777.8	222.2	143	345.7	267	343
首台机投运年份	2003	2007	2008	2008	1992	1980	1992	1994	2000
转速（r/min）	75	107.1	142.9	150	107.1	62.5	75	68.2	107.1
推力负荷（kN）	54100	35257	25600	26460	41000	33000	27500	27000	34700
外径（mm）	5200	4500	4240	4000	4500	3900	3750	4190	4150
内径（mm）	3500	2800	2740	2530	2600	2450	2350	2870	2740

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

电站名称	三峡左岸	龙滩	拉西瓦	小湾	水口	葛洲坝	岩滩	五强溪	小浪底
平均速度（m/s）	17.1	20.5	26.4	25.6	20.1	10.4	12.0	12.6	19.3
瓦数	24	18	18	16	18	18	16	18	20
瓦的结构	双层	双层	双层	双层	双层	双层	双层	双层	双层
瓦宽（mm）	850	850	750	835	975	725	700	660	705
瓦长（外径/内径）（mm）	564/380	628/391	518/335	628/397	1800	3210	3260	3250	2870
单瓦面积（cm^2）	4011	4332	3198	3769	2278	1833	1719	1500	1870
单位压力（MPa）	5.6	4.5	4.4	4.4	6.0	5.6	5.3	4.5	5.9
瓦面材料	巴氏合金	巴氏合金	巴氏合金	巴氏合金	巴氏合金	塑料	塑料	塑料	塑料

2）瓦面油室一般采用一个圆形（见图 2.4-75）或环形（见图 2.4-76）结构。三峡、龙滩、拉西瓦和小湾等大负荷推力轴承高压油室采用如图 2.4-77 所示的两个条形油沟的结构。水口推力轴承高压油室采用如图 2.4-78 所示的两个圆形油室的结构。

3）高压油室的结构尺寸以及供油压力和流量等需根据轴承尺寸、运行参数等确定。其中，油室直径 d 与以油室为中心的瓦面内切圆直径 D 之比通常取为 $0.15<d/D<0.25$，顶起高度 $h_{jack}>0.040$mm。

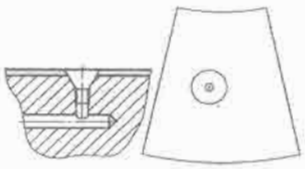


图 2.4-75 圆形高压油室

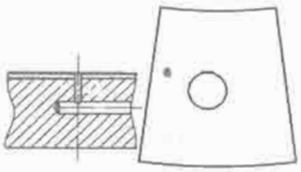


图 2.4-76 环形高压油室

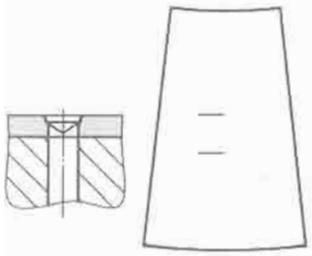


图 2.4-77 双条形高压油室

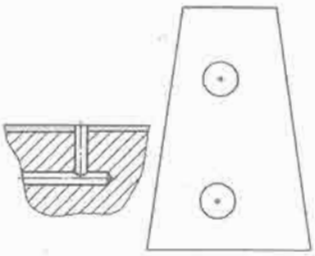


图 2.4-78 双圆形高压油室

5.4.3 推力轴承支撑

1）推力轴承结构随推力负荷不断增长而发展。各国知名厂商（公司）都有自己的传统结构。尽管结构不同，均属动压承载滑动轴承。

2）一般大容量水轮发电机转速较低，且推力负荷很大，因此大型推力轴承的设计和应该重视的研究课题是选择良好的支撑结构和润滑冷却方式。

（1）支柱螺钉支撑

1）属刚性支撑。扇形瓦直接安放在支柱螺钉头部的球面上（见图 2.4-79）。球面一般取 $SR1000$mm，其中心顶在扇形瓦偏心位置上。

2）该结构简单、安装方便、运行可靠，适用于推力负荷约 7000kN 以下的中小容量水轮发电机。对较小推力负荷，轴瓦可直接安放在支柱螺钉头部（见图 2.4-80）。为减小瓦变形，轴瓦可通过托盘安置在支柱螺钉头部（见图2.4-81）。

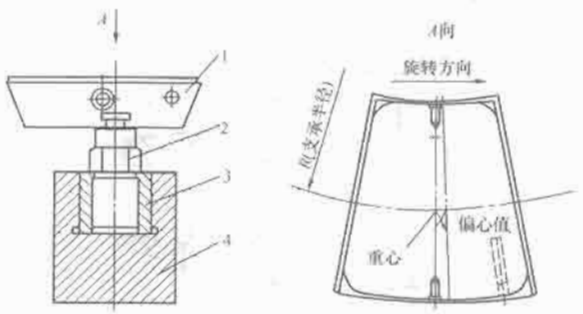


图 2.4-79 支柱螺钉支撑

1—扇形瓦；2—支柱螺钉；3—套筒；4—推力轴承座

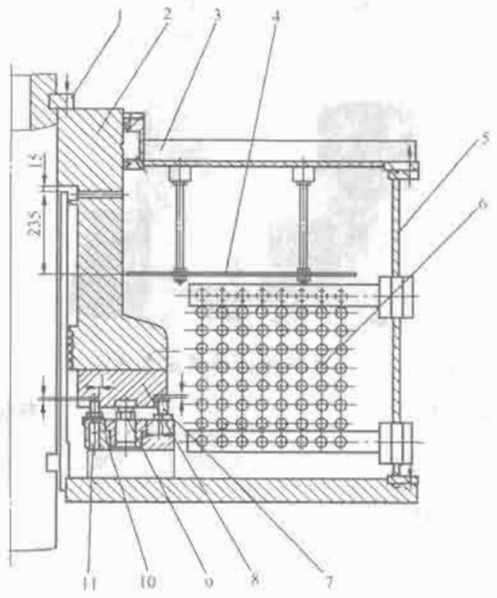


图 2.4-80 轴瓦直接安放在支柱螺钉头部的推力轴承

1—卡环；2—推力头镜板；3—油槽盖；4—稳油板；5—油槽；6—油冷却器；7—限位块；8—推力瓦；9—支柱螺钉；10—推力轴承座；11—限位螺钉

3）轴瓦的单位压力设计值宜取 3.5MPa。

（2）橡胶垫支撑

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

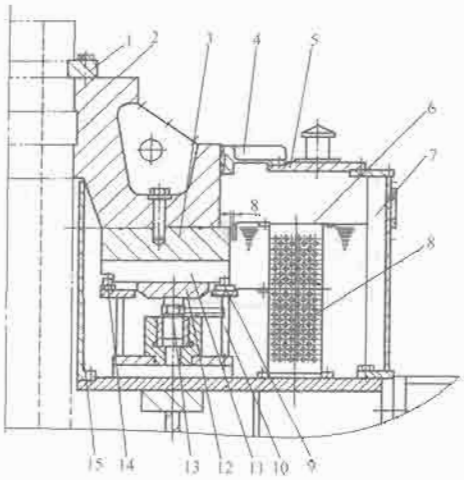


图 2.4-81 带托盘支柱螺钉头部的支撑推力轴承

1—卡环；2—推力头；3—镜板；4—密封盖；5—油槽盖；6—稳油板；7—油槽；8—油冷却器；9—限位块；10—推力轴承座；11—推力瓦；12—托盘；13—支柱螺钉；14—限位螺钉；15—挡油管

1）属弹性支撑，适用于小容量水轮发电机。其特点是将扇形瓦直接放在耐油橡胶垫上。为使轴瓦倾斜灵活，便于形成楔形油膜，整块扇形瓦出油边垫有橡胶垫，所占面积约为扇形瓦的2/3，如图2.4-82所示。

2）橡胶垫支撑偏心率宜选8.5%，靠下面两个销钉定位。

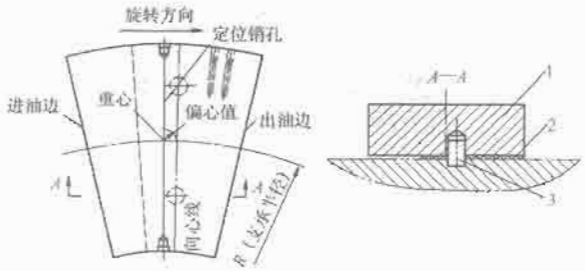


图 2.4-82 橡胶垫支撑结构

1—扇形瓦；2—橡胶垫；3—圆柱销

3）橡胶垫厚度为5mm，公差要求±0.2mm，每台份各块垫厚度相差不大于0.1mm。应采用高硬度耐油橡胶，承压达7MPa。与同容量的支柱螺钉支撑结构相比，其最高瓦温可降低10℃，且瓦间温度差值仅为2～3℃。但使用寿命较短。典型橡胶垫支撑的推力轴承结构如图2.4-83所示。

（3）弹性油箱支撑

1）属弹性支撑，是推力轴承中最佳的支撑结构。有单波纹和3波纹两种，前者工艺较简单，但承载能力小。

2）采用锻钢件加工成波纹状圆筒，将数个圆筒经连通管和有关零件装配焊接，形成密闭的连通器。再抽真空充压力油，构成弹性油箱支撑结构，如图2.4-84所示。

3）每块瓦对应一个油箱，将厚薄瓦偏心放置在弹性油箱顶面（或托盘）上。借助弹性油箱的波纹易变形性和易弯性，使轴瓦倾斜灵活，形成楔形油膜，如图2.4-85所示。对单波纹轴瓦，偏心率宜选8.5%；对三波纹为8%。

4）与支柱螺钉支撑在同等条件下相比，弹性油箱支撑瓦的负荷不均匀度小于3%；瓦间温度差值为1～3℃；轴瓦温度一般要低10℃；轴瓦单位压力可提高到4.5～5.0MPa。

5）一般单波纹弹性油箱支撑适用于负荷为7000～10000kN推力轴承，而三波纹弹性油箱适用于10000～38000kN推力轴承。典型弹性油箱支撑推力轴承结构如图2.4-86所示。

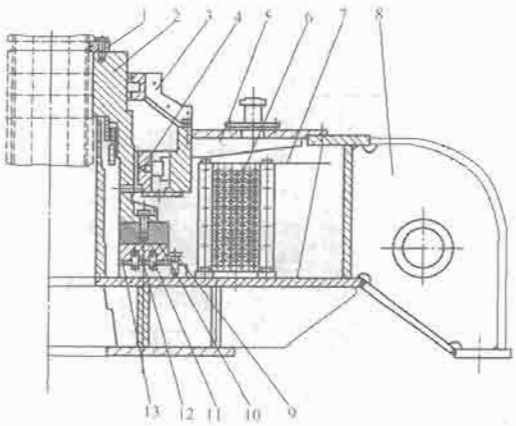


图 2.4-83 典型橡胶垫支撑结构

1—卡环；2—推力头；3—密封盖；4—导轴承；5—导轴承支架；6—油冷却器；7—稳油板；8—上机架；9—挡钉；10—镜板；11—圆柱销；12—推力瓦；13—橡胶垫

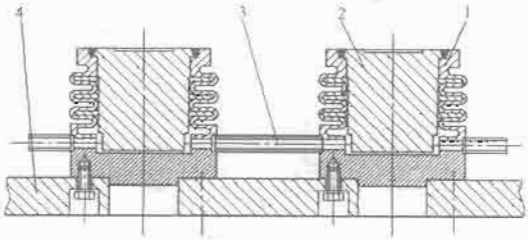


图 2.4-84 弹性油箱支撑结构

1—弹性油箱；2—支铁；3—连通管；4—底盘

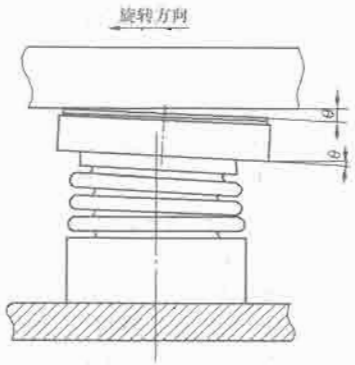


图 2.4-85 三波纹弹性油箱受力状态示意

（4）平衡块支撑

1）由互相搭接的两层梁（平衡块）组成，如图2.4-87所示。平衡块均为扇形，搭接组圆。下平衡块内、外圆中部分别开轴向槽采用固定圆柱销实现周向定位。借助径向柱面与平面垫块接触，两端只能围绕经硬化的柱面上、下摆动。上平衡块两端搭在两个下平衡块之间，搭接面为经淬火的弧面。其上下摆动原理同下平衡块。

2）平衡块支撑类似弹性油箱支撑，可使瓦间受力自动调整，且制造工艺简单，成本较低。但因其传递力的灵敏度较后者差，目前基本不采用。

（5）弹性盘支撑结构

1）由布置在瓦下面两个类似盘子形状、弹性较好的弹性盘和限位块等组成，如图2.4-88所示。上弹性盘借助压

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

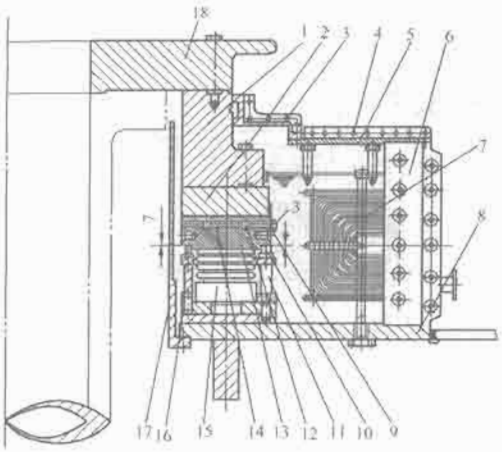


图 2.4-86 典型弹性油箱支撑推力轴承

1—推力头；2—镜板；3—密封盖；4—油槽盖；5—立圆式稳油板；6—推力油槽；7—抽屉式油冷却器；8—下机架；9—挡板；10—限位块；11—推力轴承座；12—推力瓦；13—托瓦；14—鸽尾；15—弹性油箱底盘；16—限位螺钉；17—推力挡油管；18—转子支架

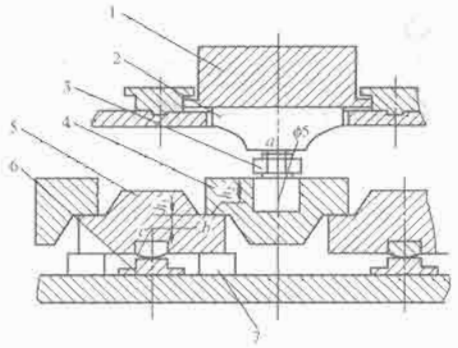


图 2.4-87 平衡块支撑结构（周向展开）

1—推力瓦；2—托盘；3—支柱螺钉；4—上平衡块；5—下平衡块；6—垫块；7—调整垫块

圈固定在轴瓦下平面上，可控制瓦的机械变形。下弹性盘放置在加工出凹槽的负荷机架上，形成上、下弹性盘背靠背的球面接触，使轴瓦倾斜灵活、易形成油膜。

2）对弹性盘高度尺寸加工精度要求严格，公差为±0.01mm。其支撑变形控制在0.5mm以内。应选择强度极限为1370～1730MPa的高强度弹簧钢，并经特殊锻造。

3）结构简单、紧凑、安装方便，适用于推力负荷为10000kN以下的高转速大容量水轮发电机和发电电动机。

（6）弹性梁支撑

1）实现每块瓦由两点支撑的刚性结构，如图2.4-89所示。推力瓦装配由轴瓦、托瓦和托盘组成，三者分别用键和销钉定位，并分别用螺栓装配成整体。

2）由两个球面支柱分别嵌装到弹性板两端，通过两个托盘按偏心位置与一块瓦相连。托盘中央镶有垫块与球面支柱呈现平面和球面接触，形成两点支撑，可使轴瓦灵活倾斜。弹性板中央向下有一凸台，凸台平面与支撑块的柱面相接触，可灵活平衡瓦的两支点受力。支撑块安装在轴承座上，与轴承座之间设有薄垫片，供安装时调整受力用。

3）对相关零件的厚度尺寸偏差及加工精度要求极严格，安装时应精细调整。

4）适用于L/B小于0.6、面积较大的细长瓦推力轴承。

表2.4-36为典型弹性支撑梁的推力轴承主要技术数据。

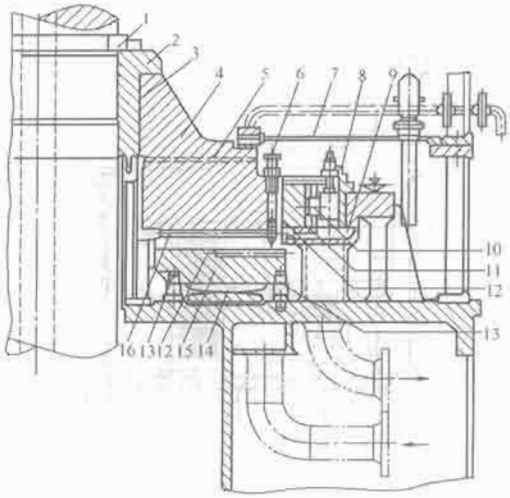


图 2.4-88 典型弹性盘支撑结构

1—卡环；2—推力头衬套；3—轴绝缘；4—推力头镜板；5—油气排出孔；6—供油调节螺钉；7—油槽盖和梳齿密封；8—盖板；9—集油槽；10—球面支柱；11—导轴承瓦；12—轴承合金；13—挡块；14—弹性盘；15—推力瓦；16—镜板泵孔

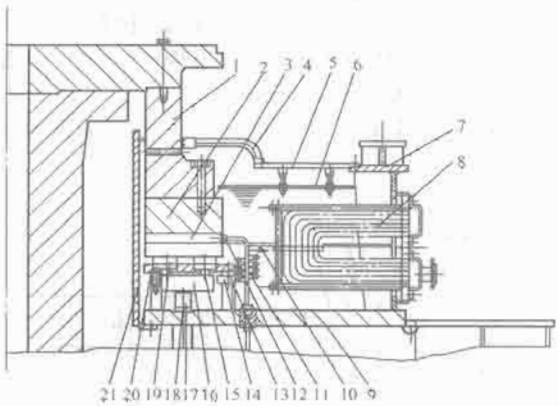


图 2.4-89 弹簧梁支撑推力轴承

1—推力头；2—镜板；3—推力瓦；4—密封盖；5—油槽盖；6—稳油板；7—推力油槽；8—抽屉式油冷却器；9—下机架；10、12—挡油板；11—高压油管；13—推力轴承座；14—垫块；15—球面支柱；16—弹性梁；17—支撑块；18—托瓦；19—托盘；20—轴承板；21—挡油管

表 2.4-36 典型弹性梁支撑推力轴承主要技术数据

名 称	水 口	白 山	回 龙
机组型式	半 伞	半 伞	悬 式
轴承外径、内径（mm）	$\frac{\phi4550}{\phi2600}$	$\frac{\phi2800}{\phi1800}$	$\frac{\phi1120}{\phi550}$
推力负荷（kN）	41202	9614	1472
转 速（r/min）	107	200	750
瓦 数	18	16	8
单位压力（MPa）	4.63	3.8	2.6
单瓦支撑点数	2	2	1

注 白山、回龙为发电电动机。

（7）弹簧组合支撑

1）双层轴瓦直接放置在由几十个小弹簧按给定的规律排列组合而成的“弹性垫”上，如图2.4-90所示。该结构为多点支撑，可显著改善轴瓦的机械变形。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2）小弹簧材料应选用高强度弹簧钢，圆钢直径为12～14mm，有效圈数为2～3。每个弹簧的性能应一致，用M16或M20固定。将合格的小弹簧交错排列摆放并固定在轴承底盘上，从轴瓦的进油侧到出油侧，摆放的小弹簧个数逐渐增多，可使轴瓦灵活倾斜，易形成油膜。小弹簧也有采用碟形弹簧的。

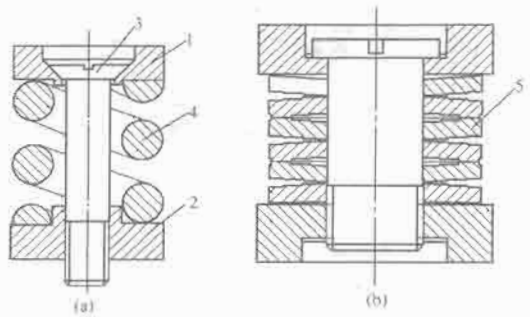


图2.4-90 小圆弹簧和碟形弹簧
(a)小圆弹簧；(b)碟形弹簧
1—上夹板；2—下夹板；3—螺钉；
4—小弹簧；5—碟形弹簧

3）结构简单、紧凑，安装方便，适用于大容量大推力负荷（10000kN以上）水轮发电机。图2.4-91所示为典型弹簧组合支撑的推力轴承。

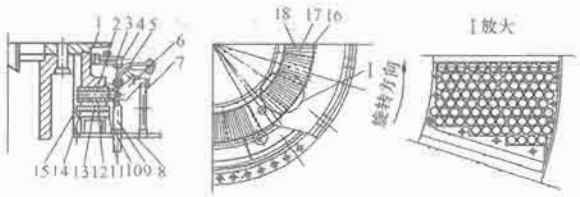


图2.4-91 典型弹簧组合支撑结构
1—推力头；2—镜板；3—密封盖；4—密封盖支架；5—出油管；6—集油槽；7—油槽；8—机架；9—进油管；10—高压油管；11、14、16、17—挡块；12—推力瓦；13—托瓦；15—挡油管；18—小弹簧

(8) 弹性杆组合支撑

1）在薄瓦和托瓦之间设置几十个弹性杆，实现多点支撑，可最大限度控制轴瓦机械变形，属刚性支撑，如图2.4-92所示。

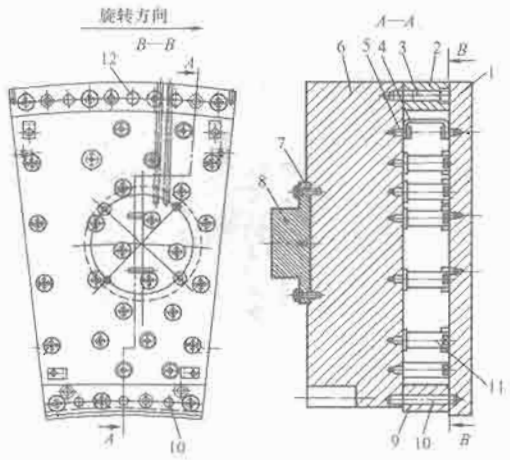


图2.4-92 弹性杆支撑
1—推力瓦；2—环板；3—螺钉；4—支撑；5、7—螺钉；6—托瓦；8—托盘；9—环板；10、12—圆柱销；11—支撑杆

2）小弹性杆材料应选用高强度圆钢42CrMo4，其直径（20mm、25mm、30mm、35mm等）可通过分析计算确定。小弹性杆固定在托瓦上，再将轴瓦（薄瓦）直接放置在该平面上。借助两端的圆柱销使轴瓦周向定位。

3）支柱螺钉采用锻钢30CrNiMo8，其中心有孔，用以安装测量杆。依靠支柱螺钉轴向变形，可测量每块瓦受力变形，如图2.4-93所示。支柱螺钉尾部端头可安装负荷传感器，将测量杆端头的位移转换成电信号数显，可较方便地调整瓦的受力。

4）图2.4-94所示为典型弹性杆组合支撑的推力轴承。表2.4-37所示为典型弹性杆组合支撑推力轴承的主要技术数据。

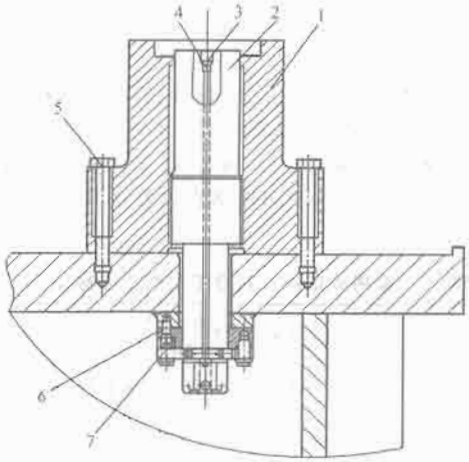


图2.4-93 弹性杆支撑支柱螺钉结构
1—支撑；2—支柱螺钉；3—螺纹销；4—测长杆；5—螺钉；6—密封环；7—止动装置

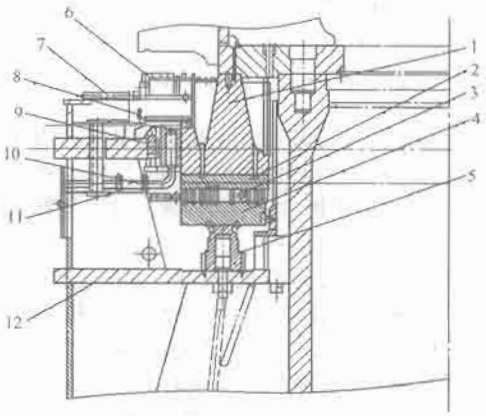


图2.4-94 典型弹性杆组合支撑推力轴承
1—推力头；2—镜板；3—瓦间隔板；4—推力瓦装配；5—锥形支撑装配；6—密封盖；7—油槽盖；8—密封盖；9—导轴承装配；10—出油管；11—隔油板；12—下机架

表2.4-37 典型弹性杆组合支撑推力轴承主要技术数据

名 称	三 峡	龙 滩	拉西瓦	小 湾
机组型式	半 伞	半 伞	半 伞	半 伞
轴承外径/内径（mm）	φ5200 φ3500	φ4500 φ2800	φ4240 φ2740	φ4100 φ2530
推力负荷（kN）	54544	35257	26000	27330
转 速（r/min）	75	107.1	142.9	150

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

名 称	三 峡	龙 滩	拉西瓦	小 湾
瓦 数	24	18	18	16
单位压力（MPa）	5.0	4.52	4.5	3.96

5.4.4 润滑冷却

（1）内循环润滑冷却系统

1）油冷却器装设在轴承油槽内，并全部浸在润滑油中以便进行热交换。冷却器应靠近镜板外缘，以获得一个合适热交换的油流速，见下式

$$v_y = 0.2 v_j^{0.5}$$

式中，v_y 为油在冷却器内的流速，m/s；v_j 为镜板外圆额定周速，m/s。

2）润滑油内循环的动力是润滑油的黏滞作用。为减小压头损失和搅拌损耗，冷却器距镜板不宜过近。

3）冷却器的结构尺寸，一般以每千瓦损耗所用冷却管长度确定。表2.4-38为不同规格冷却管及其冷却效果选择数据，供参考。

表2.4-38 常用冷却管及其冷却效果选择数据

序号	冷却管外径/内径（d_w/d_n）（mm）	比值 d_w/d_n	热阻参数 $\lg\frac{d_w}{d_n}$	每米管长表面积 f（m^2）	以φ19/φ17管为基准表面积比值	冷却效果选择数据（m/kW）
1	16/14	1.143	0.058	0.0503	0.843	5.9～7
2	19/17	1.118	0.048	0.0597	1	5～6
3	25/22	1.136	0.055	0.0785	1.315	3.8～4.6
4	28/25	1.12	0.049	0.088	1.474	3.4～4.1
5	30/27	1.111	0.046	0.0942	1.578	3.2～3.8
6	38/35	1.086	0.036	0.1194	2	2.5～3

注 1. 表中冷却效果选择数据适用于较大负荷的轴承，对小负荷的轴承其值可适当降低。

2. $\lg\frac{d_w}{d_n}$ 值与热阻成正比，供选择冷却管参考。

4）目前常用的油冷却器，主要有立式和抽屉式两种，均采用紫铜管。立式油冷却器结构如图2.4-81和图2.4-83所示，适用于悬式电机推力轴承。抽屉式油冷却器适用于伞式电机推力轴承，如图2.4-86所示。

5）润滑冷却介质为汽轮机油，其性能应符合GB 11120—1989要求。一般采用L-TSA46汽轮机油。为降低高速轴承损耗，可采用L-TSA32汽轮机油。

6）内循环润滑冷却系统，简单紧凑，运行可靠，广泛应用于各种机型、不同支撑结构的推力轴承，如图2.4-81、图2.4-83、图2.4-86所示。

（2）外循环润滑冷却系统

1）外加泵外循环。在油的循环回路系统中设置互为备用的电动油泵，作为循环动力，由冷却器、滤油器、压力表、流量显示器和阀门等元件组成。润滑油在油槽内部可采用瓦间喷管结构（见图2.4-95）或瓦间隔板结构（见图2.4-96）进行润滑。

① 瓦间喷管结构。进、出油环管布置在油槽内。在进油（冷油）环管上按瓦数布置小孔喷管，直接引入瓦间喷油润滑冷却。在出油（热油）环管上布置吸油管，将上浮的热油吸走，进入冷却器，重复循环。适用于一般负荷的推力轴承。

② 瓦间隔板结构。将成型隔板插入瓦两侧的沟槽内，

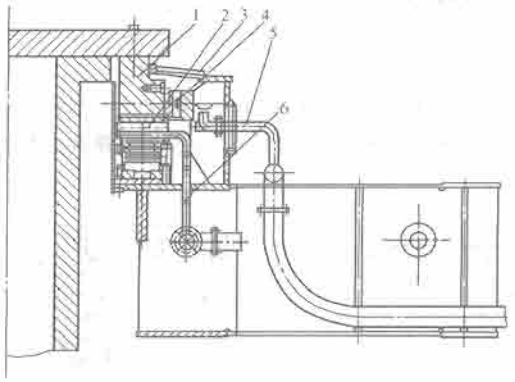


图2.4-95 外加泵外循环瓦间喷管结构
1—推力头镜板；2—推力瓦；3—密封盖；4—导轴承；5—出油管；6—喷油管

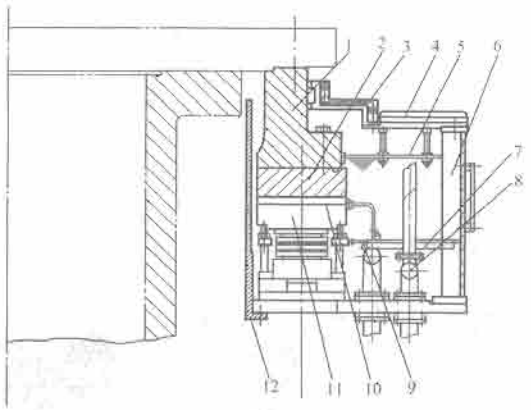


图2.4-96 外加泵外循环瓦间隔板结构
1—推力头；2—镜板；3—密封盖；4—油槽盖；5—稳油板；6—油槽；7—隔板；8—出油环管；9—进油环管；10—瓦间隔板；11—推力瓦；12—挡油管

与镜板面高度之间形成一个径向通道。该结构油槽中必须设隔油板，将油槽分成上、下两空腔。上部空腔为热油区，下部空腔为冷油区。根据情况，也可将进、出油环管布置在油槽外部，如图2.4-97所示，但必须采用连通管将冷油区的

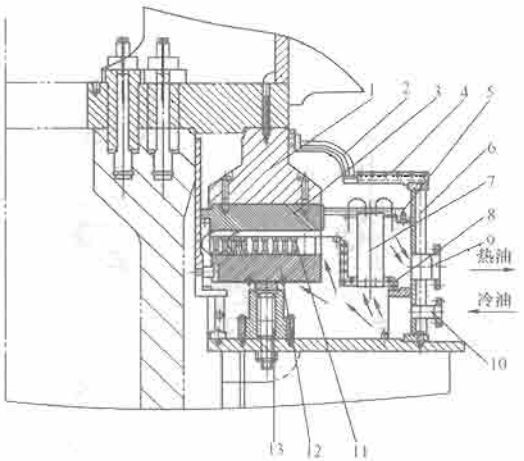


图2.4-97 外加泵外循环瓦间隔板推力轴承装配
1—推力头；2—密封盖；3—镜板；4—油槽盖；5—稳油板；6—油槽；7—连通管；8—隔油板；9—出油管；10—进油管；11—瓦间隔板；12—推力瓦装配；13—锥形支撑装配

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

一部分油引到稳油板上方，以改善轴承运行条件。适用于超大型推力轴承。

外加泵外循环系统对外部管路和元件的阻力要求不高，适用于大负荷、低速推力轴承。为消除流体计算引起的误差，对泵组的容量选择应有足够裕度。

2）自身泵外循环。

① 利用轴承本体自身提供循环动力的润滑冷却系统。其特点是不受外界电源切断和控制失灵而影响轴承正常运转。但其使用范围受机组转速等条件限制。

② 除泵组外，其他结构与外加泵外循环的相同，由油冷却器、滤油器、压力表、流量显示器和阀门等元件组成。自身泵外循环有两种结构，一种是镜板泵外循环如图 2.4-98 所示，另一种是导瓦自泵外循环如图 2.4-99 所示。

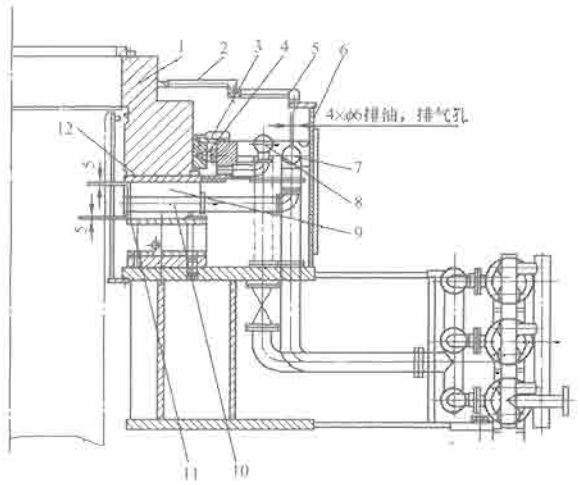


图 2.4-98 镜板泵外循环瓦间喷管推力轴承

1—推力头镜板；2—密封盖；3—集油槽；4—导轴承；5—油槽盖；6—油槽；7—进油环管；8—出油环管；9—刮油刷；10—喷管；11—挡油板；12—泵孔

（a）镜板泵外循环，亦称镜板离心泵外循环。在镜板（或推力头）上加工 12～20 个径向或后倾式径向孔，其直径一般为 16mm 或 20mm，在镜板的外圆对应泵孔外装有集油槽。轴承运转时，从泵孔打出的油流到集油槽，再从集油槽引出多路到出油环管。

（b）导瓦自泵外循环，亦称导瓦间隙泵外循环。将导瓦进油侧加宽，其加宽部分约为导瓦周向长度的 1/2，作为间隙泵的泵体（见图 2.4-99）。其表面距滑转子表面有 1mm 间隙。轴承运转时，借助油的黏滞作用，将油带入间隙，油流受阻，压力增高。增压的润滑油可按导瓦数分别引到出油环管，再从出油环管引入油冷却器，进行热交换。图 2.4-100 所示为导瓦自泵外循环瓦间隔板的推力轴承装配。

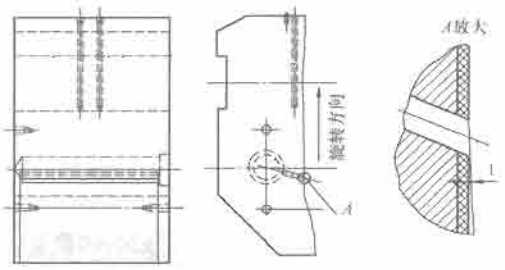


图 2.4-99 导瓦泵泵体结构

（3）外循环计算。详细计算参见参考文献 [2]。

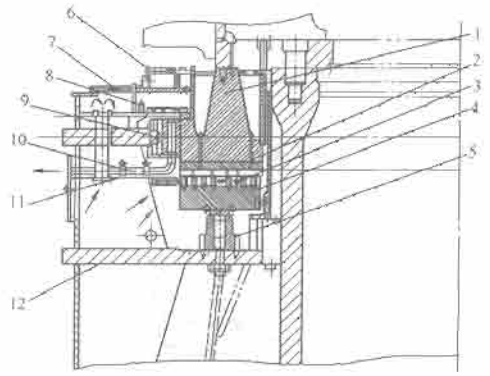


图 2.4-100 导瓦自泵外循环瓦间隔板推力轴承装配

1—推力头；2—镜板；3—瓦间隔板；4—推力瓦装配；5—锥形支撑装配；6—密封盖；7—油槽盖；8—密封盖；9—导瓦（泵体）；10—出油管；11—隔油板；12—下机架

5.4.5 密封

（1）挡油管防漏油设计要点

1）挡油管位于轴承内径处，主要有 3 种类型：单层挡油管（见图 2.4-101）、多层挡油管（见图 2.4-102）和大油槽挡油管（见图 2.4-103）。

2）应正确选择油面至挡油管上沿尺寸（H 值）。对单层挡油管 H 值取 230～270mm 为宜，高速轴承取上限值。对多层挡油管，H 值取 200～230mm。对油槽直径为 4m 以上的大油槽挡油管，H 值取 300～350mm 为宜，大油槽取上限值。

3）挡油管一般为薄壁圆筒，易产生椭圆变形，因此推力头内径与挡油管外径之间的距离（A 值）应大于 50mm。

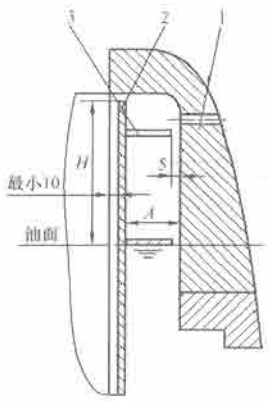


图 2.4-101 单层挡油管

1—推力头；2—挡油管；3—隔油板

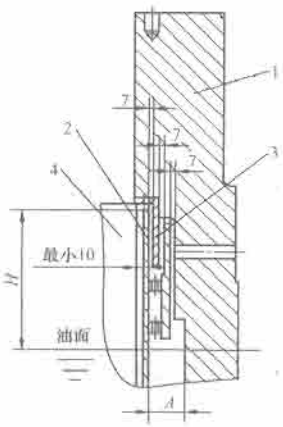


图 2.4-102 多层挡油管

1—推力头；2—挡油管；3—立圈；4—主轴

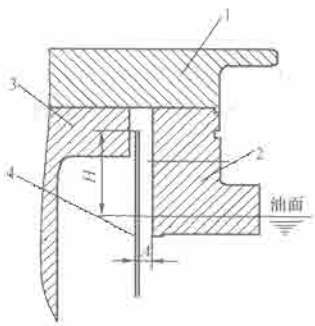


图 2.4-103 大油槽挡油管

1—转子支架；2—推力头；3—主轴；4—挡油管

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4）在可能的条件下，在挡油管适当位置设置隔油板，外径与推力头内径配合间隙为5mm，有一处隔油板必须在油面位置，另一处隔油板应距挡油管上沿30～40mm为宜。

5）直接与定、转子空间相连通的结构，为防止油雾逸出，可在挡油管下方加装密封装置，将上述两腔隔开，如图2.4-104所示。

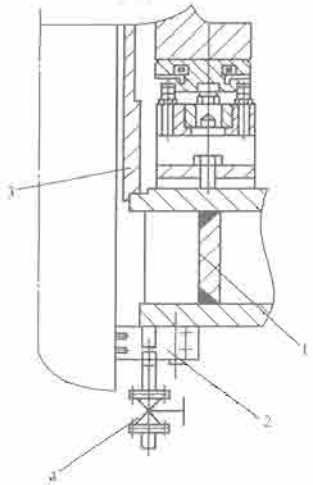


图2.4-104 隔断密封盖结构

1—机架；2—接触式密封盖；3—挡油管；4—球阀

（2）油槽盖防漏油设计要点

1）油槽盖布置在油槽顶部，与油面应有一定距离。盖上对称设有2个气窗（见图2.4-105），以平衡各腔气压，提高密封效果。

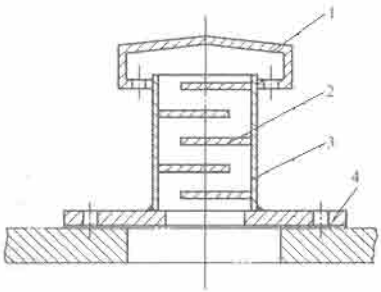


图2.4-105 气窗结构示意

1—防尘罩；2—冷凝隔板；3—筒；4—法兰

2）通常油槽盖内圆与转轴之间还装设有特殊结构的接触式密封盖。

（3）油槽防漏油密封结构

油槽与油槽盖、挡油管和机架的配合面等均采用环形沟槽耐油橡胶条密封。对分瓣油槽结构，其合缝面应采用直形沟槽耐油橡胶条密封。防漏油的关键部位是环形沟槽应与直形沟槽对齐。

（4）轴承排油雾措施

在密封盖或油槽盖（远离气窗）开孔，用管路将油雾引出至机坑外。通过排气风扇，冷凝油滴到集油箱或油雾过滤装置。

5.4.6 主要结构部件

（1）推力头

1）套轴、卡环连接的推力头。

① 带导轴承摩擦面。材料为45钢或20SiMn锻钢，应符合JB/T 1270—2002标准要求。与主轴配合段直径的配车紧量为0.02～0.06mm，典型结构如图2.4-83所示。

② 不带导轴承摩擦面。材料为ZG230-450或ZG20SiMn铸钢，应符合JB/ZQ 4297—1986《一般合金铸钢》标准要求，应按ASME A609—1980标准进行超声波探伤。与主轴配合段直径配车紧量为0～0.03mm，典型结构如图2.4-80和图2.4-81所示。

2）与转子中心体下圆板螺栓连接的推力头。

广泛用于伞式机组推力轴承。一般体积较大，采用螺栓分别与支架下圆板及镜板连接固定（见图2.4-86）。材料为ZG20SiMn铸钢，应符合JB/ZQ 4297—1986《一般合金铸钢》标准要求，应按ASME A609—1980标准进行超声波探伤。

（2）镜板

1）直接与推力瓦发生摩擦，有较高的精度要求。其材质宜选锻钢55，应符合JB/T7023—2002《水轮发电机镜板锻件技术条件》的要求。镜板的内、外径与推力瓦一致，镜板的厚度可参考表2.4-39选取。

表2.4-39 镜板厚度取值范围

镜板外径（mm）	<1300	1500～3000	3100～3600	>4000
镜板厚度（mm）	80～100	130～160	180～200	240

2）若将镜板把合在推力头上进行镜面精加工，其镜板厚度可选取较小值。如外径为5m，镜板厚度可选取85mm，但与推力头把合的螺钉应布置两排。

3）镜板和推力头合为一体，称推力头镜板，典型结构如图2.4-80和图2.4-95所示。推力头镜板结构紧凑，可取消连接螺钉，易保证安装精度。适用于推力及导轴承共用一个油槽的推力轴承。

4）对镜板的技术要求：

镜板硬度值 锻钢大于或等于180HB；

钢板大于或等于150HB；

镜板硬度差值小于或等于30HB；

镜面表面粗糙度小于或等于0.2～0.4μm（镜板直径大于3.5m取上限值）；

镜板与推力头结合面表面粗糙度小于或等于1.6μm；

内外圆表面粗糙度小于或等于1.6μm；

镜板平面度小于或等于0.2～0.4μm（镜板直径大于3.5m取上限值）；

两平面平行度小于或等于0.2～0.4μm（镜板直径大于3.5m取上限值）。

（3）推力轴瓦

1）轴承合金轴瓦（钨金瓦）。

① 由瓦坯和轴承合金组成。瓦坯采用普通钢板Q235并退火处理。轴承合金为ZSnSb11Cu6。瓦坯挂轴承合金表面应镀锡。轴承合金厚度为4mm，精加工（刮研后）要求其表面每平方厘米应有4～5点接触，其典型结构如图2.4-106所示。

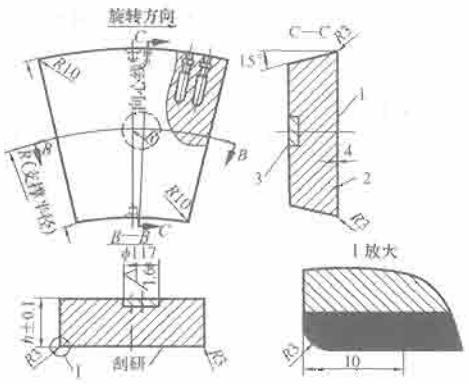


图2.4-106 典型轴承合金轴瓦结构

1—轴承合金；2—瓦坯；3—铬钢块

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

② 由支柱螺钉支撑的轴瓦，其轴瓦厚度一般为80～150mm。

③ 由弹性油箱支撑的轴瓦，应采用厚、薄瓦结构。其中薄瓦厚度均取60mm，如图2.4-107所示。对瓦坯和轴承合金的技术要求与普通轴瓦的相同。厚瓦典型结构如图2.4-108所示。托瓦（厚瓦）材料为铸钢ZG230-450，应进行退火处理，厚度为160～200mm（瓦面积较大者取上限值）。

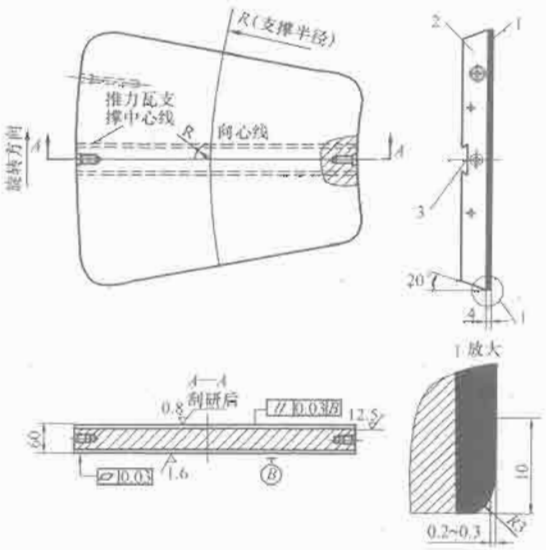


图2.4-107 薄瓦
1—轴承合金；2—瓦坯；3—鸽尾槽

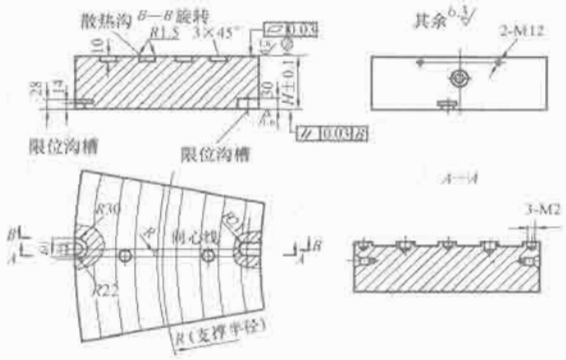


图2.4-108 厚瓦（托瓦）

2）弹性金属塑料轴瓦（塑料瓦）。

① 由瓦坯、铜丝垫和塑料层组成，通过特殊的工艺牢固地将三者结合为一体的复合材料，如图2.4-109所示。

② 瓦坯采用普通钢板Q235，应进行退火处理。其结构尺寸与轴承合金轴瓦的相同（将4mm厚的轴承合金改为9mm厚的复合材料层，其中包括3mm厚塑料层）。该塑料层采用聚四氟乙烯，经特殊工艺制作而成。

5.4.7 预防轴电流措施

发电机由于存在不平衡磁通而产生轴电压，一般为0.1～10V。轴电流值可达50～600A。轴电流一旦从轴瓦通过，易引起烧瓦事故。

（1）轴绝缘结构

半伞式发电机，多采用轴绝缘隔断结构。在顶轴上导轴承滑转子与转轴配合的轴颈处，用特殊的绝缘工艺，包绕窒温固化的绝缘层。该绝缘层中间夹有一层铜丝网，并引出一个导电检测端子，如图2.4-110所示。其特点是绝缘可靠，便于检测，推力轴瓦和各导轴瓦处不必再设置绝缘隔断层。

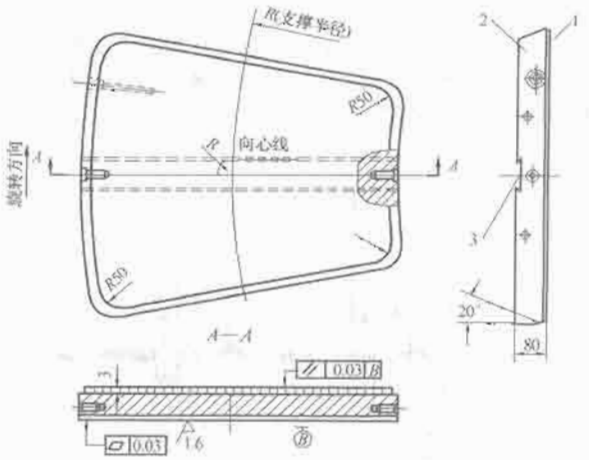


图2.4-109 弹性金属塑料瓦
1—复合材料层；2—瓦坯；3—鸽尾槽

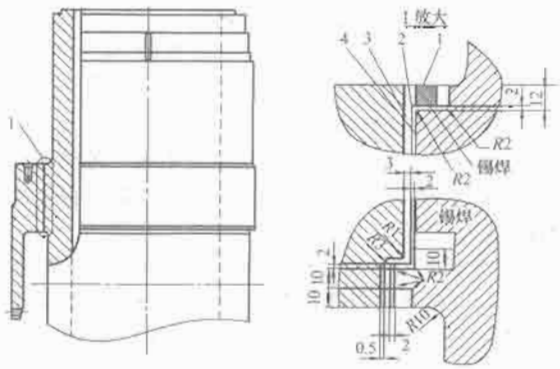


图2.4-110 轴绝缘
1—检测端子；2—铜丝网；3—内绝缘层；4—外绝缘层

（2）推力轴承绝缘结构

对推力轴瓦采用塑料瓦的悬式发电机，其推力轴承可不必设置隔断轴电流的绝缘。若采用轴承合金瓦时，必须设置隔断绝缘。

1）绝缘板隔断结构。采用2mm厚的环氧酚醛玻璃布板，整圆等分4瓣。其内、外径分别比推力轴承座底盘约伸出30mm。一般选两层，可使接缝互相交错叠放，其中底盘和机架固定采用绝缘销和绝缘螺钉，典型结构如图2.4-111所示。

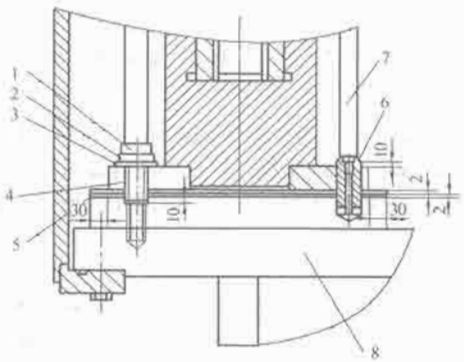


图2.4-111 推力轴承绝缘板隔断结构
1—螺钉；2—垫圈；3—绝缘垫圈；4—绝缘套管；5—绝缘垫板；6—绝缘销；7—推力轴承座；8—机架

2）中间带导电层的绝缘板隔断结构。采用5mm和8mm

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

厚的环氧酚醛玻璃布板等分4瓣，分别组圆，再用1mm厚的黄铜板，整圆等分两瓣，三者内外径相同，使两层绝缘板中间夹一层黄铜板，用M6沉头尼龙螺钉把合并黏接在推力轴承座底盘上，如图2.4-112所示。

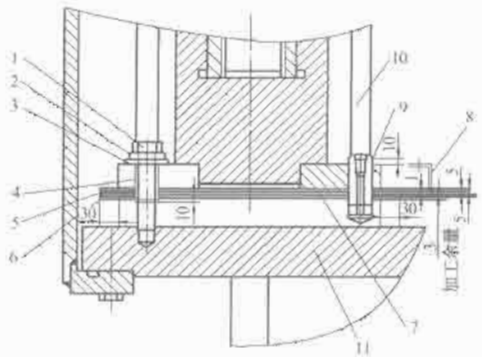


图2.4-112 带导电层的绝缘板隔断结构
1—螺钉；2—垫圈；3—绝缘垫圈；4—绝缘套管；5、6—绝缘板；7—铜板；8—检测引出端子；9—绝缘销；10—推力轴承座；11—机架

(3) 导轴承绝缘结构

对各部导瓦都采用塑料瓦的悬式发电机，各部轴承可不设置隔断轴电流的绝缘。若各部导瓦都采用轴承合金瓦，必须设置隔断绝缘。

1) 绝缘板隔断结构。对轴承支撑由球面支柱和垫块组成的结构，可在垫块背部弧面设置1mm厚环氧酚醛玻璃布板，共两层，其长、宽比垫块约大20mm，典型结构如图2.4-113所示。

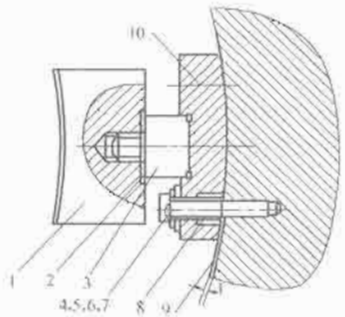


图2.4-113 导轴承绝缘板隔断结构
1—导轴承瓦；2—调整垫片；3—球面支柱；4—螺栓；5—双耳止动垫圈；6—垫圈；7—绝缘垫圈；8—绝缘套管；9—绝缘垫板；10—垫块

2) 中间带导电层的绝缘板隔断结构。对导轴承支撑由球面支柱和垫块组成的结构，可在垫块背部弧面设置带导电层的绝缘板，厚度为4.5mm，如图2.4-114所示。其长、宽比垫块大约20mm。

(4) 检测方法

1) 对中间带有导电层的隔断轴电流的绝缘结构，可用导线将导电层引出。检测时，可将导电层两侧绝缘对地绝缘，进行对地耐电压试验。对位于推力轴承和导轴承部位的隔断绝缘，可将其中间导电层引线接到端子箱，随时检测。对采用轴绝缘结构，只能在停机时检测对地绝缘。

2) 对中间无导电层的绝缘板结构，无法进行对地耐电压试验，只能在安装和检修时，用1000V绝缘电阻表测量绝缘电阻值应不低于1MΩ。

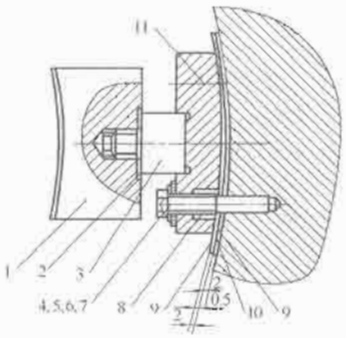


图2.4-114 导轴承带导电层的绝缘板隔断结构
1—导轴承瓦；2—调整垫片；3—球面支柱；4—螺栓；5—双耳止动垫圈；6—垫圈；7—绝缘垫圈；8—绝缘套管；9—绝缘垫板；10—检测片；11—垫块

5.5 导轴承

立式水轮发电机的导轴承主要用来承受机组转动部分的机械径向不平衡力和电磁不平衡力，使机组轴系的临界转速和摆度满足相关标准要求。

5.5.1 结构型式和应用范围

1) 根据对轴系临界转速计算的要求，机组导轴承可按2导（上导或下导+水导）或3导（上导+下导+水导）进行总体布置。一般高速机组多采用3导，中低速机组多采用2导。

2) 根据导轴承与推力轴承的相互布置关系可分为独立式和组合式结构。

① 独立式结构。导轴承与推力轴承分开，具有独立的油槽、油冷却器和滑转子（见图2.4-115、图2.4-116和图2.4-118）。该结构导轴承滑转子直径相对较小，导瓦块数相对较少，导轴承损耗也较小。但占用机组轴向空间，结构相对复杂。适用于悬式或半伞式发电机的下导轴承和大中容量悬式或半伞式发电机的上导轴承。

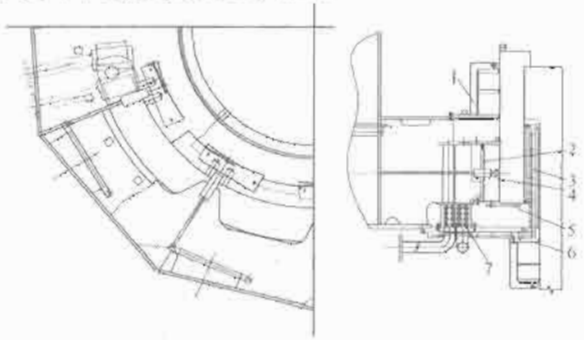


图2.4-115 独立式上导轴承结构（键式）
1、6—密封盖；2—键；3—挡油管；4—导瓦；5—泵环；7—油冷却器

② 组合式结构。导轴承与推力轴承组合在一起，共用油槽和油冷却器，一般推力头兼作导轴承滑转子（见图2.4-117）。该结构导轴承滑转子直径相对较大，导瓦块数相对较多，导轴承损耗也较大。但节省机组轴向空间，结构相对简单。适用于中小容量悬式发电机的上导轴承和伞式或半伞式发电机的下导轴承。

3) 根据导轴承瓦的支撑固定和间隙调整方式可分为支柱螺钉式、球面支柱式、楔子板式和键式4种结构。设计时可依据供货合同要求和具体结构布置需要进行选择。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

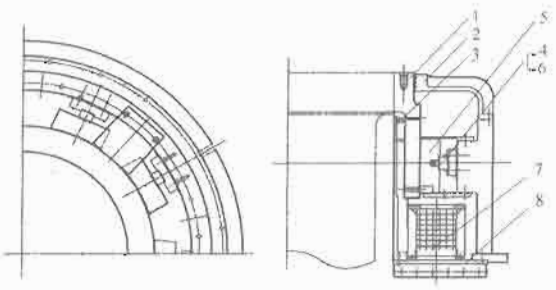


图 2.4-116 独立式上导轴承结构（球面支柱式）
1—滑转子；2—密封盖；3—挡油管；4—球面支柱；
5—导瓦；6—垫块；7—油冷却器；8—油盘底

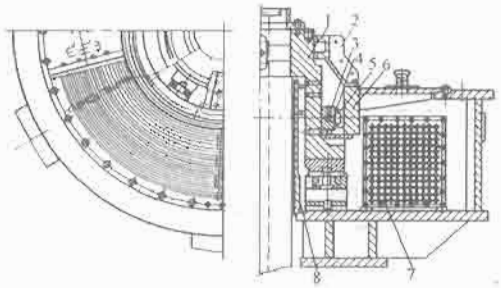


图 2.4-117 组合式上导轴承结构（球面支柱式）
1—推力头（滑转子）；2—密封盖；3—导瓦；
4—球面支柱；5—垫块；6—座圈；
7—油冷却器；8—挡油管

① 支柱螺钉式。导轴承瓦用支柱螺钉支撑固定，导轴承瓦与滑转子的间隙通过旋转支柱螺钉来调整。目前该结构很少采用。

② 球面支柱式（见图 2.4-116）。导轴承瓦用球面支柱支撑固定，导轴承瓦与滑转子的间隙通过垫片来调整。该结构适用于大中小型发电机的上下导轴承。

③ 楔子板式（见图 2.4-118）。导轴承瓦用球面支柱支撑固定，导轴承瓦与滑转子的间隙通过楔子板来调整。该结构适用于大中型发电机的上下导轴承。

④ 键式（见图 2.4-115）。导轴承瓦用键支撑固定，导轴承瓦与滑转子的间隙通过键的现场实配来调整。该结构适用于大中小型发电机的上下导轴承。

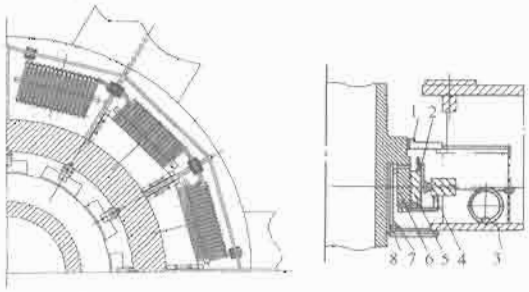


图 2.4-118 独立式下导轴承结构（楔子板式）
1—密封盖；2—楔子板；3—油冷却器；4—球面支柱；
5—导瓦；6—滑转子；7—挡油管；8—油盘底

5.5.2 设计要点

1）应符合供货合同、具体结构布置和润滑计算的要求。

2）应便于安装和检修。

3）应具有合理的油膜厚度、瓦温和油路循环。

4）静止油面一般不低于导轴承瓦的中心线。

5）为防止甩油和油雾溢出，应满足挡油管与油面的相对高度要求，并根据具体需要合理设置油密封系统。

6）应具有可靠的绝缘措施，用于防止轴电流，其绝缘电阻值不小于 1.0MΩ（1000V 绝缘电阻表）。目前多采用集中绝缘结构。

7）导轴承瓦与滑转子的间隙一般为 0.15～0.20mm。

5.5.3 润滑计算

1）导轴承作为水轮发电机的重要结构部件，其最小油膜厚度、瓦温和损耗等性能参数是主要考核指标。目前采用经典公式计算（见参考文献 [2]）和专用软件分析计算两种方法。

2）导轴承的最小油膜厚度一般为 0.05～0.1mm，最高瓦温为 70～75℃。

3）典型水轮发电机导轴承的主要技术数据见表 2.4-40。

表 2.4-40 典型水轮发电机导轴承主要技术数据

序号	电站名称 发电机型号	轴承位置	导轴承瓦			滑转子		球面支柱			油冷却器			轴承负荷（kN）	最小油膜厚度（mm）	计算瓦温（℃）	结构型式
			瓦数	内径（mm）	宽/高（mm）	外径（mm）	高度（mm）	头部直径（mm）	头部长度（mm）	球面直径（mm）	型式	管径（mm）	排数				
1	三峡右岸 SF700-80/19760	上导	10	2203	450/400	2200	1075				半环	28×1.5	2－4×4	989	0.04	56.9	键式（独立结构）
		下导	16	5220	610/380	5200	*				与推力共用外循环油冷却器			1501	0.06	58.1	键式（组合结构）
2	三板溪 SF250-36/10200	上导	12	1558	300/320	1520	835	85	33	1000	弹簧	30×2.0					楔子板式（独立结构）
		下导	12	1988.5	380/380	1940	875	85	48	1000	弹簧	30×2.0					楔子板式（独立结构）
3	索风营 SF200-52/13600	上导	12	1619.5	260/260	1580	845	60	37	1000	弹簧	30×2.0		313	0.067	43.8	球面支柱式（独立结构）
		下导	24	3590	300/300	3510	*	100	50	3000	与推力共用外循环油冷却器			700	0.086	47.8	球面支柱式（组合结构）
4	戈兰滩 SF150-42/10800	上导	12	1449.35	260/250	3510	785	60	50	1000	弹簧	30×2.0		260	0.078	41.6	球面支柱式（独立结构）
		下导	12	1845	300/250	1800	*	60	50	1000	弹簧	30×2.0		388.8	0.072	48.4	球面支柱式（独立结构）
5	大发 SF120-20/6500	上导	12	1025	180/200	1000	620	60	35	1000	箱式	25×2.0	6－3×9				球面支柱式（独立结构）
		下导	12	1435	260/300	1400	825	60	35	1000	半环	25×2.0	2－9×9				球面支柱式（独立结构）
6	瑞丽江 SF100-14/5380	上导	12	984	190/190	960	670	60	37	1000	弹簧	30×2.0		162	0.08	46.7	楔子板式（独立结构）
		下导	12	1158	240/300	1130	765	60	37	1000	半环	19×1.0	2－8×16	293	0.122	44	楔子板式（独立结构）
7	居甫渡 SF95-44/9200	上导	8	1537.5	320/250	1500	775	85	45	1000	弹簧	30×2.0		182	0.066	46.4	楔子板式（独立结构）
		下导	12	1711.75	220/220	1670	*	85	35	1000	弹簧	30×2.0		233	0.061	47.6	楔子板式（独立结构）

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

序号	电站名称 发电机型号	轴承位置	导轴承瓦			滑转子		球面支柱			油冷却器			轴承负荷(kN)	最小油膜厚度(mm)	计算瓦温(℃)	结构型式
			瓦数	内径(mm)	宽/高(mm)	外径(mm)	高度(mm)	头部直径(mm)	头部长度(mm)	球面直径(mm)	型式	管径(mm)	排数				
8	恰甫其海 SF80-34/8800	上导	12	1281.25	250/250	1250	715	60	57	1000	弹簧	30×2.0		190	0.09	43	球面支柱式(独立结构)
		下导	12	1435	250/250	1400	*	60	65	1000	弹簧	30×2.0		209	0.085	43.7	球面支柱式(独立结构)
9	三峡电源 SF50-22/5620	上导	8	932.75	240/200	910	590	60	45	1000	箱式	19×1.0	6—4×7	101	0.082	44.7	球面支柱式(独立结构)
		下导	10	1230	250/220	1200	590	60	42.5	1000	半环	19×1.0	2—6×7	176	0.094	44	球面支柱式(独立结构)
10	舟坝 SF51-48/8800	上导	8	1281.25	220/220	1250	675	60	60	1000	弹簧	30×2.0		109	0.053	45.7	球面支柱式(独立结构)
		下导	12	1537.5	200/250	1500	635	60	60	1000	弹簧	30×2.0		229	0.066	46.7	球面支柱式(独立结构)
11	英布鲁 SF30-56/7800	上导	12	1148	210/210	1120	715	85	45	1000	弹簧	30×2.0		148	0.054	43.7	楔子板式(独立结构)
		下导	12	1383	240/210	1350	*	85	45	1000	弹簧	30×2.0		140	0.062	43.3	楔子板式(独立结构)
12	大七孔 SF16-6/2680	上导	8	646	140/134	630	560	60	30	1000	盘香	30×2.0	2—3×5	30.6	0.103	42	球面支柱式(独立结构)
		下导	8	646	140/134	630	*	60	30	1000	盘香	30×2.0	2—4×5	49.0	0.078	46	球面支柱式(独立结构)

注 标*者为滑转子与推力头或轴整锻为一体。

5.5.4 主要结构部件

(1) 导轴承瓦

立式发电机大多采用分块瓦结构，通常导瓦的摩擦面积约为滑转子摩擦面积的70%～80%。瓦基可选用铸钢或钢板，现多采用Q235钢板。瓦面可选用轴承合金或塑料，多采用轴承合金。典型导轴承瓦结构如图2.4-119所示。

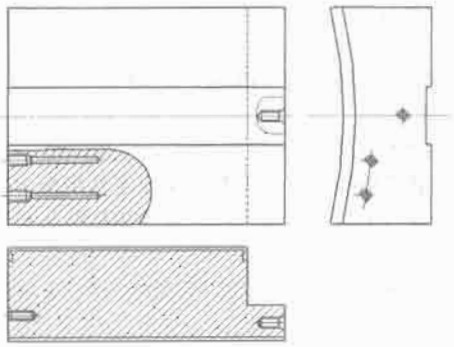


图2.4-119 典型导轴承瓦结构

(2) 滑转子

材质大多选用45锻钢（与轴整锻为一体的滑转子与轴的材质相同），需热套于轴上，并与轴一起加工。典型滑转子结构如图2.4-120所示。

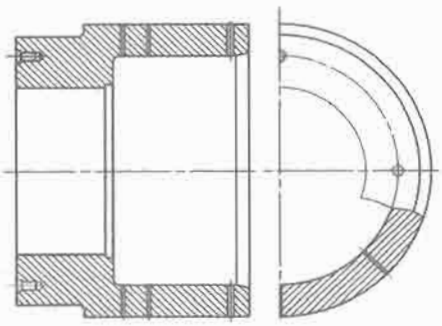


图2.4-120 典型滑转子结构

(3) 球面支柱

材质多选用锻钢GCr15，其表面需进行热处理并有较高硬度要求。典型球面支柱结构如图2.4-121所示。

(4) 键

材质多选用钢板Q345B，其厚度方向需留出适当的工地加工余量。典型键结构如图2.4-122所示。

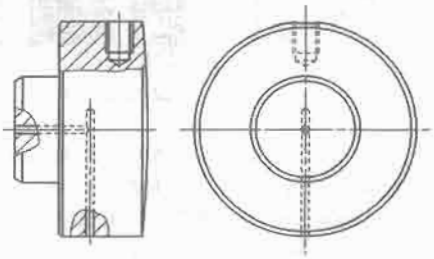


图2.4-121 典型球面支柱结构

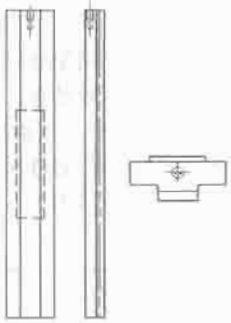


图2.4-122 典型键结构

(5) 油冷却器

1) 冷却管材质广泛选用紫铜管，也可选用镍铜管或不锈钢管。冷却管与承管板一般采用胀管法（不锈钢管采用焊接方法）进行固定密封。为防止油冷却器漏水，需按相关标准和合同要求严格进行水压试验。

2) 典型的油冷却器型式有半环式（见图2.4-123）、盘香式（见图2.4-124）、弹簧式（见图2.4-125）和箱式（见图2.4-126）。

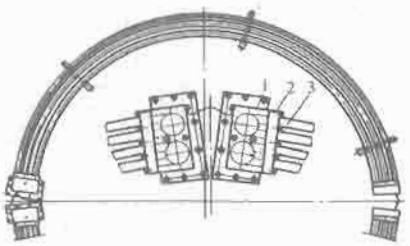


图2.4-123 半环式油冷却器

1—水箱盖；2—承管板；3—冷却管

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

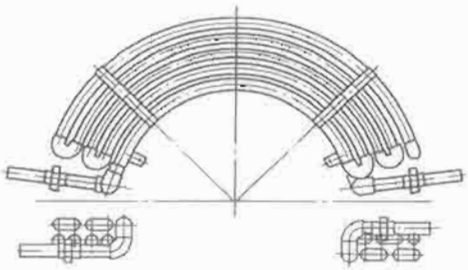


图 2.4-124 盘香式油冷却器

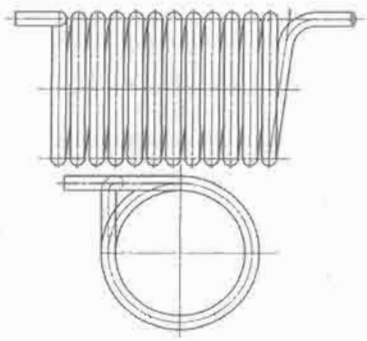


图 2.4-125 弹簧式油冷却器



图 2.4-126 箱式油冷却器

5.6 制动装置

GB/T 7894—2001 规定，额定容量为 250kVA 以上的立式水轮发电机应设有制动装置；额定容量为 1000kVA 以上的立式水轮发电机一般应采用空气制动系统。在发电机停机过程中转速降低到额定转速的 20%～30%时，应对发电机转子进行压缩空气连续制动，使其快速停机，以免推力轴承低速运行油膜破坏导致瓦面烧损。制动装置的另一个用途是在安装、检修和起动前，以高压油注入制动器，将机组转动部分顶起，以便进行机组安装、检修，或在起动时使推力瓦与镜板间形成油膜，顺利起动机组。

5.6.1 机械制动装置

(1) 制动系统

1) 水轮发电机主要采用机械制动方式，其制动系统由制动器、制动柜、管路系统及自动监测元件等组成。典型制动系统布置如图 2.4-127 所示。

2) 对制动系统的主要技术要求见表 2.4-41。

表 2.4-41 对制动系统主要技术要求

项 目	要 求
制动时气压 (MPa)	0.5～0.7
顶转子时油压 (MPa)	8～15
顶起距离 (mm)	15～20

(2) 制动器

1) 结构及规格。

① 按制动器复位方式可分为自重复位式、弹簧复位式

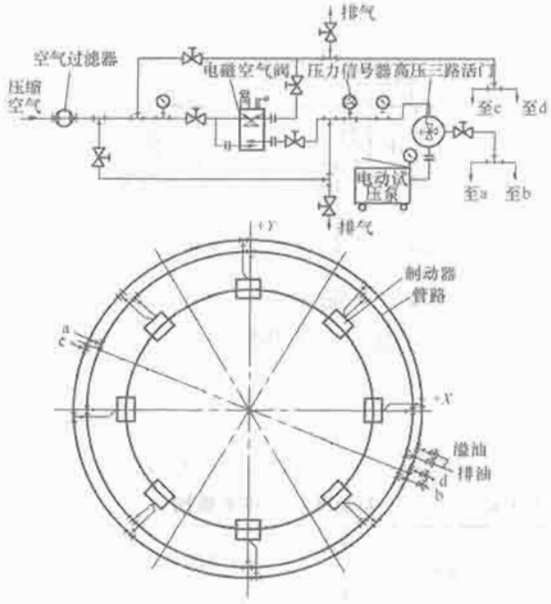


图 2.4-127 典型制动系统布置示意

(见图 2.4-128)、气压复位式 (见图 2.4-129) 等。按其油、气腔结构特点可分为油、气合一式和油、气分腔式 (见图 2.4-130) 等。后者比前者增加一个活塞，为双活塞结构，高度较高。

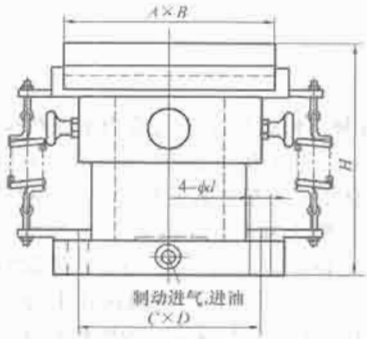


图 2.4-128 弹簧复位式制动器

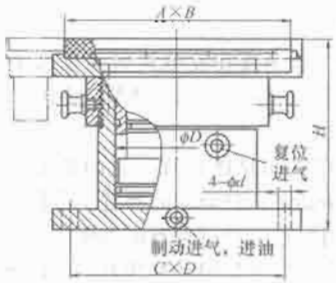


图 2.4-129 气压复位式制动器

② 制动器的密封一般采用 O 形橡胶密封圈，也有采用密封性能较好的异形橡胶密封圈。为有效防止制动器活塞发卡，可在活塞的上下两端设置导向带，以减小或消除制动侧向力影响；或采用侧向力由导向键承受的结构。

③ 制动块的材质应采用非金属无石棉类，以减小对环境污染及对人体危害，其性能应符合标准 JB/T 3334.1—2000 中有关要求。

④ 为收集制动时产生的粉尘，制动系统应设置集尘罩，将粉尘聚集，并由吸尘器将其吸走。

⑤ 常用制动器的主要技术数据见表 2.4-42。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

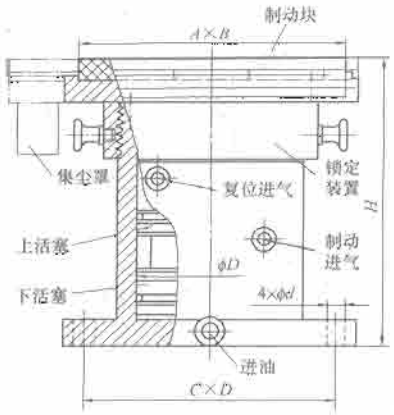


图 2.4-130 油、气分腔式制动器

表 2.4-42 制动器主要技术数据

活塞直径 D（mm）	活塞面积（cm^2）	制动块尺寸（$A\times B$）（mm）	制动器高度 H（mm）	底脚螺钉孔直径 d（mm）	底脚螺钉孔距（$C\times D$）（mm）
80	50	100×160	220	φ22	100×150
125	122	180×220	300	φ22	140×220
160	200	220×300	320	φ22	180×270
200	314	260×360	340	φ26	200×340
220	380	280×400	350	φ26	220×380
250	491	320×430	380	φ32	250×400
280	615	360×460	400	φ32	290×430

2）选择计算。根据机组的飞轮力矩及机组对机械制动的具体要求，计算确定制动器的活塞直径及其数量。机组对机械制动的具体要求主要有起始制动转速、制动时间。正常起始制动转速一般为额定转速的 20%～30%（采用塑料瓦的发电机为额定转速的 10%～20%），紧急起始制动转速为额定转速的 30%～35%。制动时间按技术协议规定，一般为 1～2min。制动器的分布直径由发电机整体结构确定。还应考虑水轮机导水机构的漏水力矩，其值约为水轮机额定力矩的 1%。

3）安装布置。

① 制动器一般布置在发电机转子支架下面或转子磁轭下面。布置在转子磁轭下面时，磁轭上端应装设卡键，以承受顶转子时的力。

② 根据发电机的总体布置，制动器可装设在下机架支臂上或单独的基础上，并应向心布置。下机架支臂或制动器基础与转子的间距远大于制动器的高度时，应设置制动器支架。其刚、强度应能满足制动和顶起转子时所承受的轴向力和切向力。制动器与其支撑（下机架支臂或制动器支架等）之间应设有不同厚度的调整垫片，以便安装时调整制动器与制动环之间的间隙。制动器的不同安放位置如图 2.4-131 所示。

5.6.2 电制动

1）转动惯量较大的水轮发电机及起动和停机频繁的发电电动机，当停机时采用机械制动，易使制动环和制动块磨损加剧，并易使制动环产生龟裂变形。因此，有的机组采用了电气制动与机械制动配合使用的制动方式。

2）电制动的原理是：当机组与电网解列，发电机定子绕组出线端直接短路或串联一个负载电阻短路，转速约降至额定转速的 50%～60%时，给发电机励磁，使它产生一个

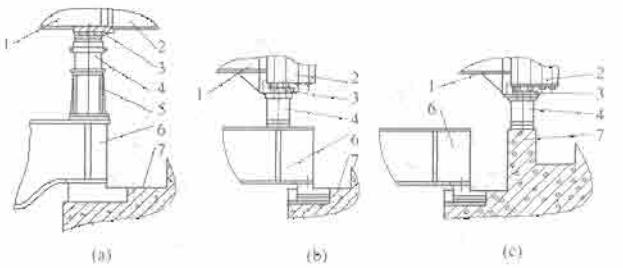


图 2.4-131 制动器不同安放位置

（a）制动器安放在制动器支架上；（b）制动器安放在下机架支臂上；（c）制动器安放在基础上

1—转子支架；2—转子磁轭；3—制动环；4—制动器；5—制动器支架；6—下机架；7—基础

电磁功率（电制动力矩）。在机组制动期间，这个制动力矩和水轮机转轮在水中转动摩擦引起的水阻力矩、发电机通风损耗引起的风摩阻力矩及轴承摩擦损耗引起的阻力矩构成机组总的阻力矩。励磁电流由蓄电池组或三相厂用电系统经整流后的外部电源供给。

（1）制动力矩与转速的关系

当机组制动时，制动力矩是转速的函数。表 2.4-43 列出各种损耗产生的原因及相应的制动力矩、制动功率与转速的近似关系。

（2）机组转速与时间的关系

1）根据制动时机组的过剩力矩等于阻力矩的关系，机组的转速与时间有下述关系

$$t = T_{mec}\left(\frac{\Delta v_1}{T_{r1}} + \frac{\Delta v_2}{T_{r2}} + \frac{\Delta v_3}{T_{r3}} + \cdots + \frac{\Delta v_n}{T_m}\right) \quad (2.4\text{-}21)$$

式中，t 为制动所需时间，s；T_{mec} 为机械时间常数，s；v_n 为用标么值表示的机组转速；T_m 为用标么值表示的机组转矩。

2）因此只要算出对应于某一速度的各种阻力矩，表示转速与时间关系的曲线即可作出，电制动力矩也可调整确定，见表 2.4-43。

表 2.4-43 制动力矩（或功率）与转速的关系

损耗产生的原因	制动功率	制动力矩
水轮机转轮摩擦损耗	$\propto n^3$	$\propto n^2$
发电机风摩损耗	$\propto n^3$	$\propto n^2$
轴承摩擦损耗	$\propto n^{1.5}$	$\propto n^{0.5}$
定子绕组铜损耗	常数	$\propto n^{-1}$
励磁绕组铜损耗	常数	$\propto n^{-1}$

（3）制动力矩计算

各种阻力矩和电制动力矩的详细计算见参考文献 2。各种制动力矩计算确定后，便可计算出总的制动力矩及停机时间，也可绘制出制动停机曲线。对发电机定子绕组出线端外串一个负载电阻短路的情况，可视为定子绕组电阻的增加。

5.7 空气冷却器

大中容量水轮发电机，一般都装设空气冷却器（也称为热交换器）。发电机内的热空气，通过空气冷却器进行冷却，再进入电机内部，如此循环不已，将发电机的电气损耗和通风损耗所产生的热量通过空气冷却器的冷却水带走。

1）空气冷却器一般通过支架固定在机座壁上，且沿圆周等距分布（见图 2.4-132 和图 2.4-133）。也有采用 4 个滚轮支撑紧靠机座壁的冷却器并用压板压紧的结构。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

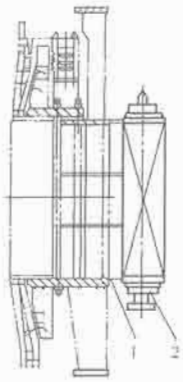


图 2.4-132 空气冷却器装置
1—空气冷却器支架；2—空气冷却器

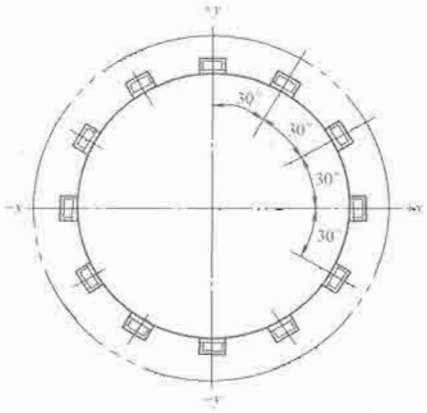


图 2.4-133 空气冷却器布置示意

2）有关标准规定：额定容量为 12.5MVA 及以下的水轮发电机用空气冷却器进水温度按 28℃设计，12.5MVA 以上的水轮发电机用空气冷却器进水温度按 30℃设计。空气冷却器的出风温度不得高于 40℃，并应留有 15%以上的换热裕量，其工作水压按不低于 0.2MPa 设计，试验水压不低于工作水压的 1.5 倍。若供给空气冷却器的循环水由水管连接的阀门或减压装置控制，而水源的压力又高于空气冷却器的工作水压，空气冷却器应按较高压力设计，试验应在 1.5 倍压力下进行。

3）空气冷却器由多根冷却水管（冷却元件）、上、下承管板，密封橡皮垫和上、下水箱等零部件组成（见图 2.4-134）。

4）空气冷却器通常可分为穿片式、挤片式、绕片式和绕簧式等结构。大中容量水轮发电机，一般装设 8 个或 12 个空气冷却器。设计时还应考虑当某一个冷却器退出运行，其他冷却器应能带走全部损耗热量，不致影响发电机的正常运行。

5）各个冷却器采用并联方式通过阀门连接至环形进出水管上。也有采用两个冷却器串联后再互相并联的连接方式。

6）冷却水管可为立式放置，也可水平放置。两种方式放置的空气冷却器，在参数计算及结构设计方面没有什么区别。

5.7.1 承管板

1）冷却器的骨架，用以固定冷却水管，一般用 Q235 钢板加工而成（见图 2.4-135）。

2）对承管板的技术要求。

① 为保证承管板与箱盖接触密封良好，承管板表面粗糙度应不低于 R_a6.3，边缘不得有毛刺，胀接的孔不得有贯通性刻痕。

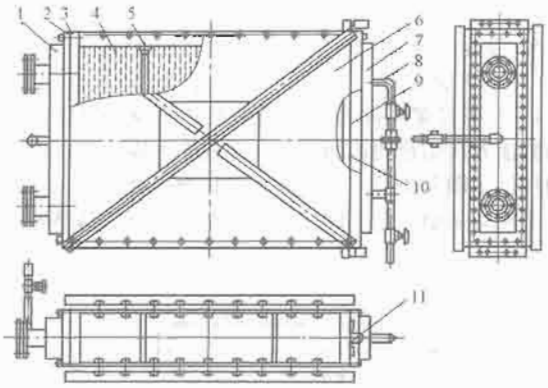


图 2.4-134 空气冷却器
1—下水箱盖；2—下橡皮垫；3—下承管板；4—冷却管；5—管夹块；6—护板；7—上水箱盖；8—排气阀；9—上橡皮垫；10—上承管板；11—吊环

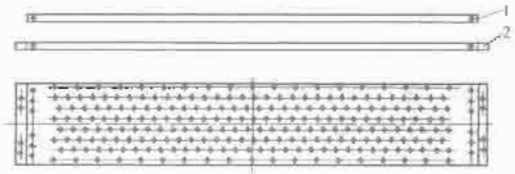


图 2.4-135 承管板
1—下承管板；2—上承管板

② 承管板加工后，表面应进行镀锌处理。

5.7.2 水箱盖

1）上、下水箱盖与承管板组成冷却器的上下水箱。水箱与冷却水管构成冷却水通路。水箱盖为钢板焊接结构（见图 2.4-136 和图 2.4-137）。

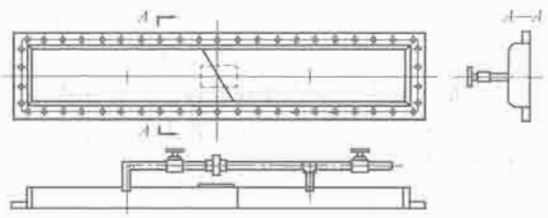


图 2.4-136 上水箱盖

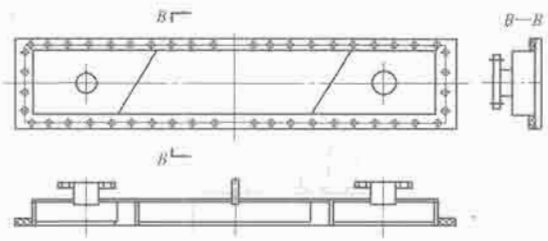


图 2.4-137 下水箱盖

2）对水箱盖的技术要求。

① 水箱盖与橡皮垫接触的表面粗糙度为 R_a6.3，边缘不得有毛刺。

② 考虑到安装时水箱盖的互换性与通用性，水箱盖进、出水法兰的中心距偏差为±1mm；水箱盖加工面对法兰平面的不平行度不得大于法兰外径的 1/100，最大不大于

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2mm。

5.7.3 冷却元件

(1) 穿片式结构

1) 将铜管穿入冲有凸缘的多孔铝（铜）箔片内，然后采用胀接方法结合固定而制成。多孔铝（铜）箔片即形成散热翅片（见图 2.4-138）。其特点是传热性能高、风阻低、制造工艺相对复杂、整体性好、运行时冷却器清洁整齐、维修方便。

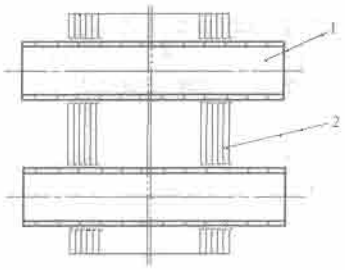


图 2.4-138 穿片式冷却元件结构
1—铜管；2—翅片

2) 铜管及翅片应符合有关规范和用户要求。应根据水质含沙量选择铜管直径。

(2) 挤片式结构

1) 挤片式冷却元件的铝翅片应用刀具挤压方法与铜管组成一体（见图 2.4-139）。其特点是传热性能较高、风阻低、制造工艺较简单、运行时冷却器清洁整齐、维修方便。

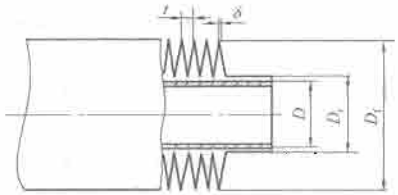


图 2.4-139 挤片式冷却元件结构
D—铜管外径；D_1—翅片外径；D_2—翅片根径；
δ—翅片厚度；t—翅片节距

2) 应根据水质含沙量选择铜管直径。铜管外表面在加工时须露出金属光泽。翅片表面应清洁无油污，翅片不得有磕碰和倒塌缺陷，并应完全包覆铜管，不应有开裂现象。

(3) 绕片式结构

将铜带折成 L 形后绕于铜管上并焊牢（见图 2.4-140）。翅片表面应清洁干净，不应有明显的裂纹、缺口等。其特点是传热性能较高、风阻低、制造工艺简单、运行时冷却器清洁整齐、维修方便。

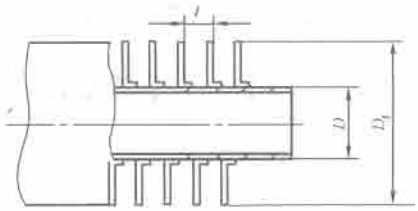


图 2.4-140 绕片式冷却元件结构
D—铜管外径；D_1—翅片外径；t—翅片节距

(4) 绕簧式结构

由于制造工艺复杂，近几年在大中型水轮发电机上已很少采用。

5.8 灭火系统

1) GB/T 7894—2001 规定：额定容量为 12.5MVA 及以上的水轮发电机应装设水喷雾灭火装置。灭火系统由水喷雾灭火装置、探测器（感温型和感烟型）、消防机械操作柜、消防电气操作柜和管道及附件等组成。通常在定子绕组端部附近设置灭火装置。对特大型水轮发电机，有时也在转子支架通风孔附近增设灭火环管，以增加喷水雾面积，提高灭火效果。

2) 国内装设的水轮发电机主要采用水喷雾灭火，极少量水轮发电机采用二氧化碳灭火。

5.8.1 水喷雾灭火装置

1) 由输水管路和喷雾头等组成。图 2.4-141 为典型水喷雾环形灭火管道布置。上环形灭火水管布置在定子线圈的上端部，通常用角钢和管夹固定于上机架支臂上；下环形灭火水管布置在定子线圈的下端部，用管夹固定于基础上，也可固定于下挡风板或下机架支臂上。

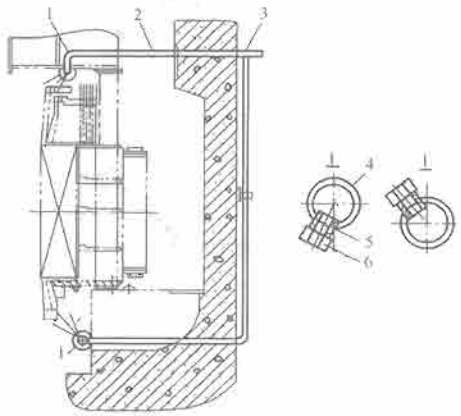


图 2.4-141 典型水喷雾环形灭火管道布置
1—弯头；2—供水管；3—三通；
4—环形管；5—接头；6—喷嘴

2) 为便于制造和运输，环形管等分成 2、4、6、8 等管段。

3) 灭火管道多采用双路进水结构，如图 2.4-142 所示。上、下灭火环形管通过三通与进水管相连。在上、下灭火环形管上布置水喷雾头，其数量、位置和角度，应能使喷出的水覆盖住全部定子和转子线圈。喷雾头喷射直径（ϕ）、距喷嘴的距离（H）与水压的关系可见表 2.4-44。

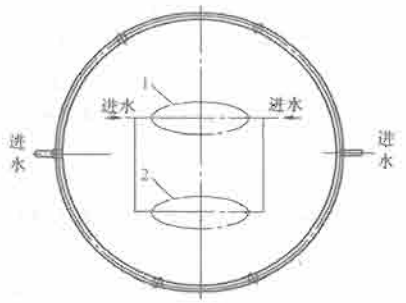


图2.4-142 灭火管道双路进水布置示意
1—上灭火水管；2—下灭火水管

4) 喷雾头的水压应不低于 0.35MPa，在距离喷头 0.3m 处取样时，应成雾状。图 2.4-143 所示为喷嘴的水压与喷雾头流量的关系，供参考。通常要求喷淋水量的强度不小于 10L/(m·min)，灭火持续时间不少于 10min。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 2.4-44 喷雾头喷射直径 ϕ、距喷嘴的距离 H 与水压的关系

ϕ(m) / H(m) / 压力(MPa)	0.5	1.0	1.25	1.5	1.8	2.0
0.05	1.4	2.5	2.8	3.2	3.6	3.8
0.1	1.38	2.2	2.6	2.9	3.3	3.5
0.3	1.2	2.1	2.4	2.6	2.9	3.1
0.5	1.1	1.6	1.9	2.0	2.2	2.3

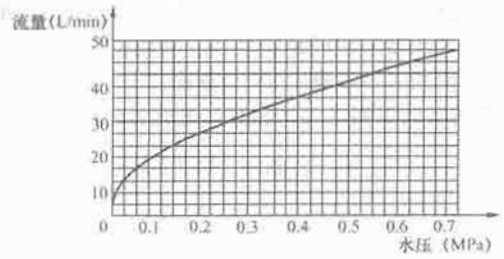


图 2.4-143 喷嘴的水压与喷雾头流量的关系曲线

5）上、下灭火环形管多采用 DN50 不锈钢管，进水管多采用 DN65 不锈钢管。

6）供水管、管件、喷头等宜采用不锈钢或其他无磁性且防锈蚀的材料制成。

7）该装置结构简单，运行管理成本低，但灭火后线圈需清理并进行干燥处理，检修时间较长。

5.8.2 二氧化碳灭火装置

1）国外装设的水轮发电机主要采用二氧化碳灭火。其优点是结构简单、灭火响应时间快、灭火时间较短。但相对水喷雾灭火系统，运行管理成本较高。

2）一般采用全淹没灭火方式。要求下挡风板不得有开口，上挡风板的开口面积不得大于防护区总内表面积的3%。

3）图 2.4-144 为典型二氧化碳灭火管道布置。由钢瓶、放气管嘴、称重装置、热继电器等控制元件及管路和附件组成。

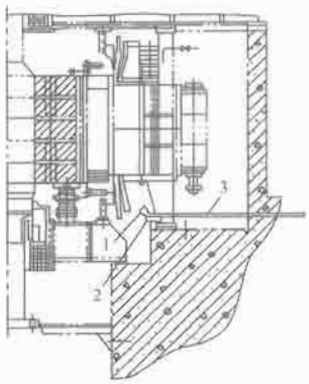


图 2.4-144 典型二氧化碳灭火管道布置
1—喷嘴；2—环形管；3—供气管

5.9 中性点接地装置

5.9.1 中性点接地方式的种类及特征

水轮发电机中性点接地分为不接地、经消弧线圈接地和高电阻接地方式。

1）中性点不接地。当发生单相接地故障时，非故障相电压升高为$\sqrt{3}$倍相电压，线电压值不变。水轮发电机可短时带故障运行，但接地产生的过电压值高，通常为 3.5（标么值）。允许单相故障电流很小，此方式适用于小容量机组。

2）中性点经消弧线圈接地。可补偿电容电流，加速接地电流过零熄弧，减少弧光重燃。但易产生振荡过电压，可达 3.2（标么值）。

3）中性点经高电阻接地。受设备制造能力的限制，一般采用接地变压器及二次侧接小电阻以形成高阻的接地方式。采用该接地方式，可限制过电压不超过 2.6 倍额定相电压。根据国外水轮发电机组运行实践经验，接地故障电流限制在 20～30A、且接地故障时间不超过 30s 时，不会对定子铁心造成烧损。

5.9.2 中性点接地方式选择

1）发电机定子绕组发生单相接地故障时，接地点流过的电流是水轮发电机本身及其引出回路所连接设备（主母线、厂用分支线、主变压器低压绕组等）的对地电容电流。当它超过允许值时，将烧伤定子铁心，进而损坏定子绕组绝缘，引起匝间或相间短路。

2）中性点接地方式应根据水轮发电机的接线、连接导体和变压器低压侧等连接设备对地电容电流的大小以及供电可靠性和机组绝缘耐电压性能等要求选择确定。

3）一般大中型水轮发电机多采用经消弧线圈接地或经二次侧带负载电阻的配电变压器接地。对前者，当发电机发生单相接地短路时，利用消弧线圈产生的电感电流抵消发电机回路的部分电容电流，将其故障点电流限制在允许范围内，并允许水轮发电机带故障继续运行 2h。而继电保护可不直接动作于机组的紧急跳闸，只是输出信号至调度中心和值班人员，提供现场处理事故的机会，以便系统调整负荷，保护区域电力系统的稳定。对采用中性点经二次侧带负载电阻的配电变压器接地方式，当发生单相接地短路时，利用电阻损耗作用，限制机组最大单相接地故障电流和水轮发电机过电压的幅值及陡度在允许范围内，并且立即动作于跳闸，切除机组，能可靠地保护水轮发电机。该接地方式在国外有较多的运行经验，配套保护也很成熟。国内三峡、岩滩、隔河岩、江垭等水电站发电机均采用这种接地方式，运行情况良好。

4）根据我国相关标准规定，水轮发电机中性点接地方式的选择原则如下：

① 当水轮发电机内部发生单相接地故障不要求快速切机、且故障电容电流不超过表 2.4-45 规定的允许值时，中性点应采用不接地方式。

② 当水轮发电机内部发生单相接地故障不要求快速切机、且故障电容电流大于表 2.4-45 规定的允许值时，中性点应采用消弧线圈接地方式。补偿后的残余电流应不超过表 2.4-45 的规定值。

③ 当水轮发电机内部发生单相接地故障要求快速切机时，中性点宜采用高电阻接地方式，且电阻器宜接在水轮发电机中性点所接单相变压器的二次绕组上。

表 2.4-45 水轮发电机允许单相故障电流值

额定电压（kV）	3.15～6.3	10.5	13.8～15.75	18～20
故障点残余电流（A）	≤4.0	≤3.0	≤2.0	≤1.0

5.9.3 消弧线圈

1）对具有直配线的水轮发电机，消弧线圈宜采用过补偿方式，以防止运行方式改变时，电容电流减小，使消弧线

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

圈处于谐振点运行。消弧线圈可接在水轮发电机的中性点上，也可接在厂用变压器的中性点上。对单元接线的水轮发电机，为限制电容耦合传递过电压以及频率变动等对中性点位移电压的影响，消弧线圈宜采用欠补偿方式，并应接在水轮发电机的中性点上。

2）消弧线圈的容量应根据水轮发电机系统接地电容电流确定，并按下式计算

$$W = kI_C \frac{U_N}{\sqrt{3}} \tag{2.4-22}$$

式中，W 为消弧线圈的容量，kVA；k 为系数，对过补偿方式取 1.35，欠补偿按脱谐度确定；I_C 为水轮发电机回路的接地电容电流，A；U_N 为水轮发电机额定线电压，kV。

上述公式计算出的消弧线圈容量系按运行时间不小于2h的全容量。当消弧线圈短时运行时，其容量可按一定过载倍数适当降低。

3）经消弧线圈接地的水轮发电机，在正常运行情况下，其中性点长时间电压位移应不超过水轮发电机额定电压的10%。单元接线水轮发电机的脱谐度不超过±30%，直配线水轮发电机的脱谐度不超过10%。

5.9.4 接地变压器和电阻

1）接入水轮发电机中性点高电阻值的大小，将影响水轮发电机单相接地时健全相暂时过电压值。按运行机组的耐电压值为1.5倍水轮发电机额定电压，则健全相暂时过电压不宜超过2.6倍额定相电压。此时电阻值应按下式计算

$$R = \frac{1}{2\pi f C} \tag{2.4-23}$$

式中，R 为中性点接入电阻值，Ω；f 为水轮发电机工作频率，Hz；C 为水轮发电机电压系统三相对地总电容值，μF。

2）为防止水轮发电机发生单相接地时，中性点接地变压器产生较大的励磁涌流，变压器额定电压不宜选择低于发电机的额定电压。可通过降低变压器设计磁通密度使变压器额定电压为发电机额定相电压。变压器的容量与其工作时间有关，可按下式计算

$$S = \frac{U_1 I_C}{K_1} \tag{2.4-24}$$

式中，S 为变压器容量，kVA；U_1 为变压器额定电压，kV；I_C 为水轮发电机单相接地时电容电流，A；K_1 为过负荷系数，根据GB/T 17211《干式电力变压器负载导则》的规定并结合变压器采用的绝缘等级、线圈的导体电流密度、过负荷运行时间（一般取60s）计算确定。

3）变压器低压侧接入电阻值，按下式计算

$$R_2 = Rk^2 - \frac{PU_2^2}{S^2} \tag{2.4-25}$$

式中，R_2 为变压器低压侧接入电阻值，Ω；U_2 为变压器低压侧电压，kV；k 为变压器变比，$k=U_2/U_1$；P 为变压器总损耗，W。

6 通风冷却系统

目前，水轮发电机广泛采用空气冷却方式。随着结构设计优化及材料和冷却技术的进步和发展，空冷技术更加广泛地应用在巨型机组上。一些巨型机组也可采用内冷技术，主要有水内冷及蒸发冷却两种方式。表2.4-46为典型大容量水轮发电机主要技术数据。

表 2.4-46　典型大容量水轮发电机主要技术数据

电站名称	S_N(MVA)	U_N(kV)	$\cos\varphi_N$	n_N(r/min)	冷却方式	装机台数	制造厂(公司)
龙　滩	778	18	0.9	107.1	空冷	7	哈电、东电、ALSTOM公司合作制造
小　湾	778	18	0.9	150	空冷	6	哈电、ALSTOM公司合作制造
古　里	700/805	18	0.9	112.5	空冷	10	东芝、日立、三菱、GE等
依泰普	824	18	0.85/0.95	90.9/92.3	半水冷	9+9	原西门子、BBC公司
三峡左岸	778/840	20	0.9	75	半水冷	8+6	ALSTOM、哈电、VGS、东电合作制造
三峡右岸	778/840	20	0.9	75	空冷及半水冷	4+4+4	哈电供23#～26#空冷机组
李家峡4#机	445	18	0.9	125	定子蒸冷	3+1	东电
拉西瓦	757	18	0.925	142.9	空冷	6	哈电
金安桥	667	18	0.9	93.8	空冷	4	东电
构皮滩	667	18	0.9	125	空冷	2+3	东电、ALSTOM
锦屏1级	649/700	20	0.925	142.9	空冷	6	哈电
二　滩	612/642	18	0.9/0.95	142.9	空冷	6	GE公司、哈电、东电
瀑布沟	511/667	18	0.9	125	空冷	6	东电

6.1 冷却方式分类、特点及适用范围

1）水轮发电机的冷却方式主要分两大类，即间接冷却和直接内部冷却。间接冷却用的冷却介质是空气，而直接冷却采用两种冷却介质，一种为纯水（靠水具有高比热特性直接作用在被冷却物质内部）；另一种为低沸点的蒸发介质（靠冷却介质液相变汽相吸收较高的汽化潜热直接冷却）。表2.4-47为空冷发电机和液内冷发电机特点比较。

表 2.4-47　空冷发电机和液内冷发电机特点比较

序号	项　目	空　冷	液内冷
1	电机体积	略大	较小
2	电机重量	略重	较轻
3	电机价格	相当	相当
4	辅机价格	较低	较高
5	总价格	较低	较高

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

序号	项 目	空 冷	液内冷
6	土建投资	相当	相当
7	空载损耗	较大	较小
8	定子铜耗	较小	较大
9	发电机效率	相当	相当
10	设计复杂程度	较小	较大
11	监控元器件	少	较多
12	维修工作量	小	大
13	维修时间	较短	较长
14	净化水系统①	无	必备
15	水质	一般	要求较高
16	直轴瞬态电抗	较低	较高
17	机械应力	相当	相当
18	热变形和热老化	较大，现代技术可以解决线棒的自由膨胀问题	较小，线棒自由膨胀问题易解决
19	转动惯量	易满足要求	满足相同 GD^2 值条件下，体积减小受限制
20	安装周期及工作量	短、简单	长、复杂
21	可利用系数(%)	95～99	90～95
22	运行管理水平	一般	要求较高，复杂
23	事故率	低	高

① 对采用蒸发冷却方式发电机，无需配备净化水系统，只需配备冷凝器等装置。

2）液内冷技术相对空冷技术冷却效果较好，但结构复杂、故障率高些。选择冷却方式时首先应考虑机组的容量等级、电压、支路数与槽电流的匹配及热流密度的分析计算和控制(参见本章第2节)。从维护、操作和运行、高度灵活性出发，应优先考虑和尽量采用空冷技术，可节省运行费用，维护人员少，机组运行效率及年利用小时数高。

6.2 通风系统

1）一个良好的通风系统，应能产生足够的冷却风量、均匀的冷却效果和最小的通风损耗；结构简单、安全可靠及安装检修方便；有时还应满足电站厂房的结构及利用发电机的热风供冬季厂房取暖的需要。

2）不同的通风系统对散热条件影响很大，选择合理的通风系统可提高有效材料的利用，从而使得电机重量减轻、造价降低。

3）根据发电机容量、产生的损耗值以及转子的压头，水轮发电机的通风系统有开启式通风、管道式通风和具有空气冷却器的闭路循环空气冷却系统3种。

4）按冷却空气的流动方向，可分为径向、轴向及复合通风方式。根据建立风压的方法，可分为自通风和强迫通风(又称外鼓风)方式。前者的风压是由发电机的转子和固定于转子上的风扇产生的；而后者的风压则是由单独拖动的风扇产生的，多用于灯泡式水轮发电机和抽水蓄能电站的大容量、长铁心发电电动机。

6.2.1 开启式自通风系统

适用于额定容量为1000kVA及以下的水轮发电机，其特点是结构简单、安装方便，如图2.4-145所示。电机温度受环境温度影响较大，防尘、防潮性能差，绝缘易受侵蚀。冷空气由机房摄入，热空气排到机房里，发电机需要的冷却空气量一般不超过8m³/s。厂房的墙壁和屋顶外表面足以散掉排到机房内的热空气所携带的热量。

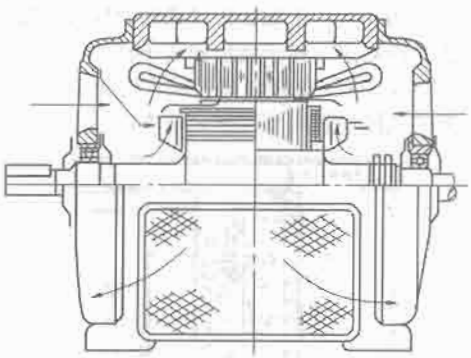


图2.4-145 开启式自通风系统

6.2.2 管道式通风系统

适用于额定容量为1000kVA以上，但不大于4000kVA的水轮发电机。冷风一般来自于温度较低的水轮机室，热空气则靠电机自身的风压作用经管道排到厂房外面，如图2.4-146所示。为使空气清洁，在进风风路中常装设滤尘器。

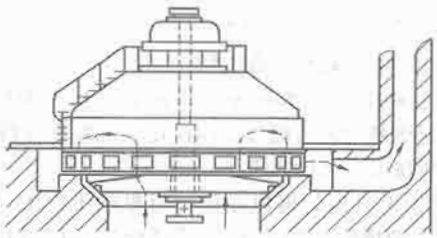


图2.4-146 管道式通风系统

6.2.3 闭路自循环通风系统

适用于额定容量为4000kVA以上的水轮发电机。其特点是利用空气冷却器进行热交换、冷风温度稳定、空气清洁干燥、有利于绝缘寿命，同时安装维修较方便。按其风路特点，闭路自循环通风系统可分为以下几类：

(1) 密闭双路径向通风系统

广泛应用于中、大型发电机。在双路径向通风系统中(见图2.4-147)，从空气冷却器出来的冷空气经上机架支臂之间的空隙(上路)和基础风道(下路)进入转子支架。在转子支臂本身的离心风压及装设在磁轭两端的风扇压头作用下，少部分流经绕组端部，大部分通过转子磁轭风沟、磁极极间间隙和空气隙，流经定子风沟；还有一少部分流经齿压板间隙，然后汇集并经机座冷却器窗孔进入空气冷却器。为避免线圈端部空间的空气沿风扇反向流动形成涡流，应装设挡风

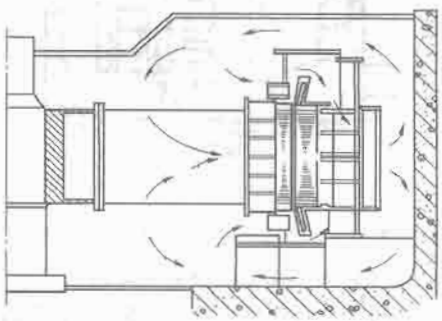


图2.4-147 密闭双路径向通风系统

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

板。双路径向通风的特点是风阻小、风路短、定转子具有径向风沟、散热面积大。由于设置径向风沟，使电机铁心长度约增加 20%。

(2) 双路轴、径向通风系统

适用于中、大容量水轮发电机。其特点是依靠电机磁极的离心抽风作用和上、下端旋浆风扇轴向压入冷却空气并流过定子风沟，冷却定、转子绕组和定子铁心，风路简单，如图 2.4-148 所示。转子无径向风沟，支臂无轴向风孔，通风损耗小；旋浆式风扇轴向作用强，效率高。

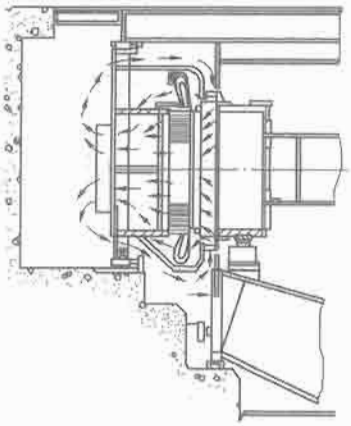


图 2.4-148 双路轴、径向通风系统

(3) 双路径向无风扇通风系统

1) 大容量低转速水轮发电机的直径较大而铁心较短，转子转动时所鼓动的气流已足以使定子绕组端部得到充分冷却，转子两端可不装设风扇。

2) 对于无风扇的通风系统，可根据不同的冷却特点，采取一些辅助措施，如增加转子磁轭的径向通风沟数量，形成以转子支架和磁轭径向通风沟为压力源的径向通风系统；在风路结构上装设不同型式的挡风板，使风量沿有效部分均匀分布并加强绕组端部冷却，以改善通风冷却效果。

3) 图 2.4-149 所式无风扇通风系统适用于大容量中、低速水轮发电机。其特点是充分利用转子支架和转子磁轭的扇风作用；为加强转子扇风效应，应减小入口损失；增加转子径向风沟数量，以增加过流面积；利用回风(即从空气冷却器出来的冷风)直接冷却定子绕组端部；转子上、下端装设平面挡风板，增强两端气隙压力，改善冷却效果。

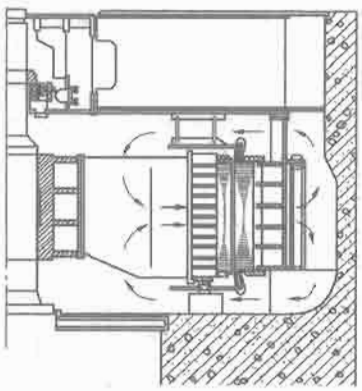


图 2.4-149 双路径向无风扇通风系统(一)

4) 图 2.4-150 所示为无风扇通风系统适用于大容量中、低速水轮发电机。其特点是利用转子支臂鼓动气流的一部分冷却绕组端部，使上、下端腔形成较大的稳压室。

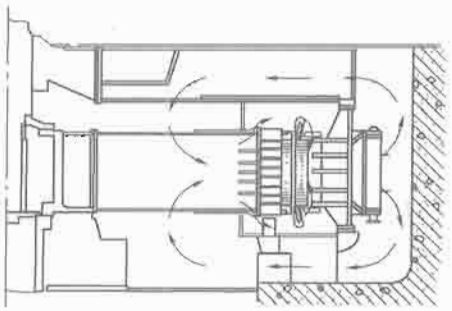


图 2.4-150 双路径向无风扇通风系统(二)

5) 图 2.4-151 的径向无风扇通风系统的特点是缩小定子绕组端部端腔的空间，对改善端部冷却和减少端部回风有利。

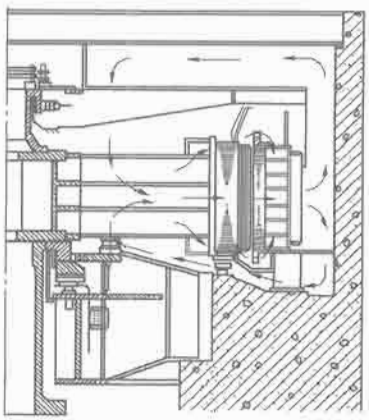


图2.4-151 双路径向无风扇通风系统(三)

(4) 单路径向通风系统

该通风系统(见图 2.4-152)曾在 20 世纪 50 年代用于个别中、低速水轮发电机。有两种风路结构，一种是仅有上部风道而无下部基础风道；另一种是仅有下部基础风道。目前，这两种风路系统已极少采用。

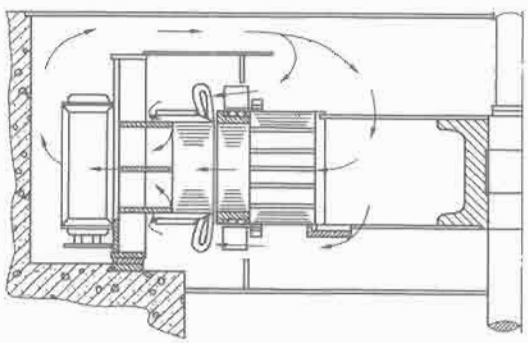


图 2.4-152 单路径向通风系统

6.3 定子绕组水直接冷却

6.3.1 设计特点

1) 水轮发电机的利用系数 C 表示单位转速、单位体积的视在功率。它反映材料的利用水平，与电机常数 C_A 互为倒数关系，其表达式为

$$C = \frac{S_N}{D_i^2 L_t n_N} = KAB_\delta \qquad (2.4\text{-}26)$$

式中，C 为利用系数，kVA/(m³·r/min)；D_i、L_t 分别为定子铁心内径和长度，m；n_N 为额定转速，r/min；A 为电负荷，A/cm；B_δ 为气隙平均磁通密度，T；K 为系数，通常

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

为1.35×10⁻³。

2）液内冷水轮发电机的电、磁负荷值可较大幅度提高，导致利用系数在很大范围内变化。提高 A 值可提高利用系数。但 A 值提高导致定、转子铜损和附加损耗增加、电气参数（X'_d、X''_d）增大及 GD^2 减小。应根据所要求参数和综合技术经济指标合理地确定利用系数，即在满足运行性能的条件下使发电机有最低的折合价值（考虑发电机本身的成本、效率和与电站厂房建筑、起重机、水处理设备及运行费用等有关的折合价值）。

6.3.2 外部水系统

1）水内冷水轮发电机均采用封闭式冷却水循环系统，如图2.4-153所示。

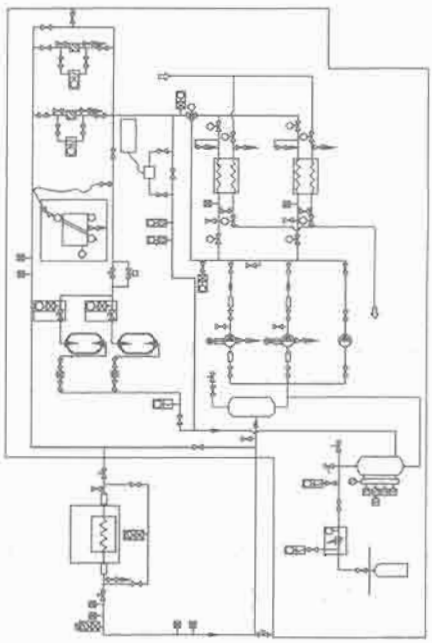


图2.4-153 典型水内冷发电机定子循环水系统

它主要由循环水泵、冷却器、机械过滤器、离子交换器、水箱、温度计、流量计、压力计、电导率计等组成。此外，还装设各种保护装置，以便发生事故时能照常供水。在定、转子水路的出口处通常装有流量继电器和温度继电器。当水量减小或水温过高时，保护装置发出警报并自动起动备用水泵。为安全、可靠和维护检修方便，一般可备一套冷却器、机械过滤器及水泵等。

2）运行过程中水中含铁和铜量逐渐增加（管道及水路零件防腐不良引起）。因此，密闭循环的水必须定期处理，使水质纯净、无固体杂质。定子进、出水装置密封不严会引起漏水，应定期给系统补充处理水（即经过离子交换处理后的水）。

6.3.3 水系统运行方式

常用的水系统运行方式有以下两种：

1）补充定量处理水。当水的电导率超过规定标准时，将水箱中的水排掉一部分，同时补充同容积的处理水。这种运行方式不太经济。

2）局部循环水处理。将密闭循环的水引出一部分，经过处理后，再流回水箱，始终保持一定量的水得到处理。经验证明，局部循环处理的水量为总循环水量的几十分之一，就可保持水的电导率在较低的数值范围内。这种运行方式较经济合理。

6.3.4 对冷却水质的要求

1）冷却水在定、转子空心导线内部流动，水质应纯净、无固体杂质，其电导率为0.5～1.5μS/cm（水温为25℃时），pH值为6～8；硬度小于2μmol/L。

2）通常，水中常含有钙、镁、钠、铁、锰、钾、铜等阳离子，而阴离子有酸性碳酸根、硫酸根、氯化物、硝酸根、硅化物、氟化物等。可用离子交换树脂使这些离子置换、化合，以提取纯水。其纯度要比用蒸馏法所得的还要高，并且工艺简单，维护费用较少，已获得广泛应用。

6.3.5 定子线棒串联根数选择

定子每一个并联水支路内串联的线棒根数应根据每一线棒内的损耗、允许的水温升和水量综合分析计算确定。

6.3.6 转子绕组冷却方式

当水轮发电机定子采用水内冷却方式，简单地增加风量并不能显著地降低转子温升。在风量不变的条件下，转子绕组采用加强冷却结构，温升能显著降低。常用的加强冷却结构有：

1）铜线钻孔或冲槽结构。

2）架空线圈或双层线圈结构。

3）线圈匝间架空或铜线开设沟槽结构。

4）空心铜线内部通风。

5）外表面加强通风冷却结构。

6）气流的均匀分配结构。

6.3.7 铁心的冷却结构

发电机采用全水冷方式，定子铁心常用的冷却方式有：

1）铁心背部装设冷却水管。

2）在铁心叠片间装设冷却片。

6.4 定子绕组蒸发冷却

6.4.1 设计特点

定子绕组采用蒸发冷却方式的设计与计算，可参照水内冷方式。具体技术参数选择可参见本章第2节。

6.4.2 蒸发冷却系统

主要由定子绕组（包括定子铜环引线）、冷凝器、回液管、下集液环管、绝缘引流管、上集汽环管、均压管、排气管、密封构件等组成。图2.4-154所示为定子蒸发冷却系统示意图。

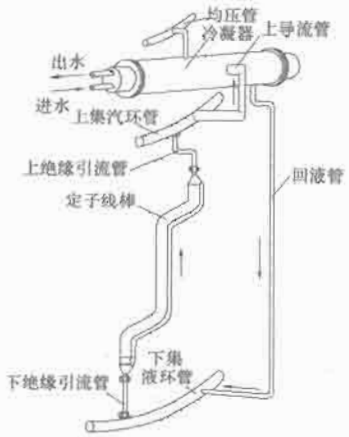


图2.4-154 定子蒸发冷却系统示意图

6.4.3 其他问题

正确合理选择低沸点、符合环保要求的介质、装设严密的监测系统及元件（漏水检测、液位检测等）、允许冷凝器断水机组运行的容量及持续时间规定等是蒸发冷却方式应重视

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

的问题。

7 灯泡式水轮发电机

灯泡贯流式水轮发电机组具有结构布置紧凑、机组间距小、电站开挖量小、投资少、工期短、收效快等优点，已在低水头(2～25m)电站中获得广泛应用。

7.1 电磁设计

灯泡式水轮发电机较一般立式水轮发电机的转速低，为改善水流条件、提高机组效率，其直径要设计得小些，定子铁心相对要长些。这一特点对发电机的技术参数、飞轮力矩、通风冷却及结构等设计选择有直接影响。

7.1.1 灯泡比

1) 定子机座外径与水轮机转轮外径的比值。它对水轮机的水力特性和发电机的主要尺寸、电磁参数、冷却性能以及机组安装等有直接影响。

2) 灯泡比选择过大，使水轮机的水力特性变坏，机组的效率降低；灯泡比选择过小，导致转子结构布置困难，通风冷却效果差。通常灯泡比取0.8～1.2。

7.1.2 主要尺寸和电磁参数

当灯泡比确定后，相对同等容量和转速的立式机组，灯泡式水轮发电机定子铁心内径约缩小1/3，而长度则需增加约1倍。因此综合措施是：加强通风冷却效果，缩短铁心长度，采用高性能绝缘材料和高导磁低损耗铁磁材料，来提高电机的利用系数。电负荷通常取500～700A/cm，平均气隙磁通密度取0.6～0.85T。

7.1.3 额定电压

1) 发电机在水中流道内运行，环境湿度大，线圈绝缘容易受潮。为安全可靠运行，电压选择应比一般水轮发电机的低。

2) 发电机的气隙比立式水轮发电机的小，容易产生较大的单边磁拉力。应采用集中布置的波绕组和叠绕组，以减小由于气隙不均匀而引起的单边磁拉力。发电机的电压可参照表2.4-48选择。

表2.4-48 额定容量与额定电压的关系

额定容量 S_N(MVA)	<10	8～15	13～30	28及以上
额定电压 U_N(kV)	3.15	6.3	10.5	13.8

7.1.4 额定功率因数和气隙长度

1) 发电机受灯泡比的影响，其定子直径比立式水轮发电机的小，极距也小，转子励磁绕组的极间空间位置较小，励磁安匝数受到一定限制。所以，灯泡式水轮发电机的功率因数应选择高些，气隙长度选择小些。

2) 额定功率因数的取值范围应符合JB/T7071—2005《灯泡式水轮发电机基本技术条件》，具体要求见表2.4-49。

表2.4-49 额定容量与额定功率因数的关系

额定容量 S_N(MVA)	≤5	5.1～10	10.1～25	>25
额定功率因数 $\cos\varphi_N$(滞后)	0.85	0.9	0.92	0.95

7.1.5 飞轮力矩和机械时间常数

1) 发电机定子内径较小，飞轮力矩 GD^2 也相应减小。机组的速度上升率 β 较高，一般可达45%以上。飞逸转速也比立式水轮发电机的高，约为额定转速的2.5～3.5倍。

2) GD^2 过小，将使系统的动态稳定性降低。对灯泡式水轮发电机，机械时间常数 T_{mec} 通常为0.8～2.0s。

7.1.6 定子槽数

受定子铁心内径的限制，发电机的每极每相槽数 q 较小，一般 $1<q<3$。应对分数槽次谐波磁动势可能引起的定子铁心磁振动和空载电压波形的畸变进行分析计算。

表2.4-50为典型灯泡式水轮发电机主要技术数据。

表2.4-50 典型灯泡式水轮发电机主要技术数据

电站名称	P_N(MW)	U_N(kV)	I_N(A)	$\cos\varphi_N$	n_N/n_r(r/min)	灯泡比 D_i/D_b	备注
法国朗斯	10	3.5	1650	1.0	98.75/380	0.812	ALSTOM，双向运行，充压0.2MPa
白垢	10	3.15	1992	0.92	78.95/215	1.018	原天津发电设备厂，充压0.2MPa
木京	10	6.3	1078	0.85	83.3/240	1.16	哈电
都平	15	6.3	1494	0.92	88.2/228	1.138	原天津发电设备厂
马迹塘	18.5	10.5	1072	0.95	75/207	1.142	VATECH(ELIN)，充压0.25MPa
江口	20	10.5	1195	0.92	78.95/205	1.18	哈电
富金坝	20	10.5	1222	0.9	120/360	1.16	哈电
马回	23	10.5	1405	0.9	115.4/323	1.109	VATECH(ELIN)
株洲航电	28	10.5	1710.7	0.90	65.2/200	1.20	哈电
凌津滩	30	10.5	1736	0.95	78.95/252	1.12	日立、哈电
大源渡	30	10.5	1837	0.9	65.2/180	1.20	VATECH(ELIN)
贵港	30	10.5	1793	0.92	78.95/265	1.145	原ABB、东电
红岩子	30	10.5	1833	0.9	83.33/260	1.116	东电
百龙滩	32	10.5	1852	0.95	93.8/310	1.188	原富春江富士
飞来峡	35.5	10.5	2144.4	0.9	83.33/265	1.228	VATECH(ELIN)
红花	38	10.5	2458.2	0.85	107.1/320	1.20	哈电和东电各供3台机
印度竹拉兰	39	11	2274	0.9	100/290	1.19	哈电
尼那	40	10.5	2315	0.95	107.1/337	1.2	ALSTOM
康扬	40.75	10.5	2359	0.95	125/350	1.19	哈电
长洲	42	13.8	1910	0.92	75/240	1.19	哈电、东芝(8台)；东电(4台)；ALSTOM(3台)

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

电站名称	P_N(MW)	U_N(kV)	I_N(A)	$\cos\varphi_N$	n_N/n_r(r/min)	灯泡比 D_1/D_b	备 注
洪 江	45	10.5	2605	0.95	136.4/370	1.19	ALSTOM、哈电
炳 灵	48	13.8	2114	0.95	107.1/330	1.19	哈 电
日本只见	65	11	3591	0.95	100/170(282)	1.12	日 立

7.2 结构及主要尺寸选择

7.2.1 总体布置

发电机的总体结构布置既要考虑合理性，又要充分考虑结构的紧凑和安装、维护、检修的需要，应注意以下几个问题：

(1) 通风冷却系统布置

由于整个发电机处于流道之中，属过流部件，因此，其外形尺寸和形状应适应水轮机水力设计的要求。发电机的泡体直径受灯泡比的限制，导致径向尺寸减小，而轴向尺寸增大，机组通风冷却系统的布置和设计成为关键问题。

(2) 组合轴承布置

1) 同其他卧式发电机组一样，组合轴承除承受径向磁拉力外，还要承受发电机转子、主轴和水轮机转轮重量的连续载荷，正向推力轴承承受正向水推力载荷，反向推力轴承承受机组停机时的反方向冲击载荷。

2) 机组通常采用卧式2导轴承或3导轴承支撑结构。两种结构均要求机组转动部分的第一阶临界转速不小于飞逸转速的1.2倍。对2导轴承结构布置(见图2.4-155)，因其轴向长度短、结构紧凑、安装、调整方便，应优先考虑。其主要特点是发电机同水轮机共用一根主轴，发电机转子上游侧与集电环支架连接，下游侧与发电机端主轴法兰连接。组合轴承位于转子下游侧，转子和水轮机转轮呈双悬臂式结构。其优点是可避免组合轴承油雾对发电机的污染，两个轴承受力比较均匀，轴承间隙调整简便，且便于在水轮机腔内检修轴承。

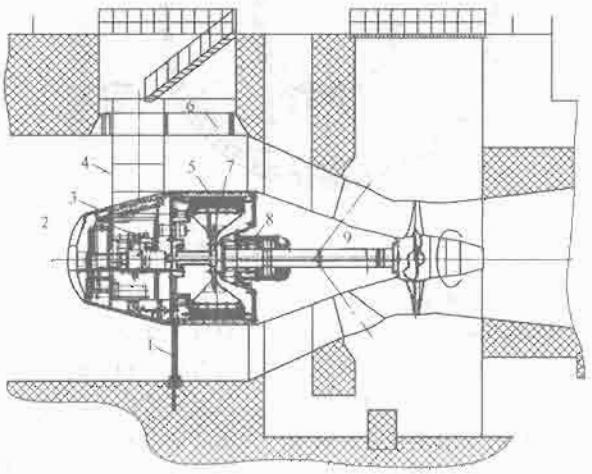


图2.4-155 2导轴承灯泡式水轮发电机
1—垂直支撑；2—泡头；3—冷却套；4—进入竖井；5—定子；6—流道盖板；7—转子；8—组合轴承；9—水导轴承

3) 当机组容量较大、机组转动部分的临界转速不能满足要求或轴承负荷很大时，应考虑采用3导轴承结构，如图2.4-156所示。其特点是在发电机转子上游侧的灯泡体内布置一个导轴承，转子下游侧的管形座内布置组合轴承。优点是运行和维护较方便，但机组安装、检修和整个轴系调整的难度较大。目前国内正在研发3导轴承结构的灯泡贯流式水轮发电机组。

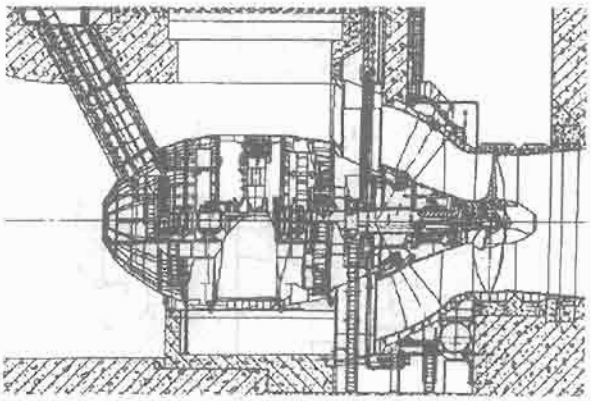


图2.4-156 3导轴承灯泡贯流式水轮发电机组

(3) 支撑结构布置

1) 灯泡体通过螺栓与定子机座连接，机座与水轮机管形座固定在一起，而管形座又固定在基础上。这是发电机的主要支撑结构。

2) 为了进一步提高机组的整体刚、强度，减小振动和水流波动的影响，提高机组运行的稳定性，还应在上游侧增设辅助支撑。其支撑型式有以下几种：

① 在灯泡体或定子机座外缘装设一定数量的径向拉杆，如图2.4-157所示。由于拉杆的预紧力不易调整且受力不均匀，此结构仅适用于小容量机组。

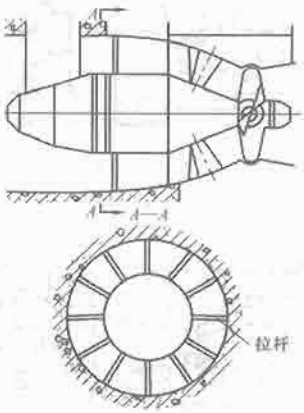


图2.4-157 径向拉杆支撑

② 在灯泡体外缘装设3个互成一定角度的支撑，其中发电机进入竖井(通道)是一个支撑，如图2.4-158所示。

③ 在灯泡体外缘装设水平和垂直方向的4点支撑，其中发电机进入竖井是一个支撑。灯泡体下部的垂直支撑又分为：带基础大支墩(流线型结构)和小支脚结构(见图2.4-159)及不带基础大支墩(见图2.4-160)两种结构，应根据机组流道水力设计确定。

④ 在灯泡体外缘装设水平和垂直方向的5点支撑，其中发电机进入竖井是一个支撑。灯泡体下部的支撑由两组支脚组成，又可分为带基础大支墩(流线型结构)和小支脚结构

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

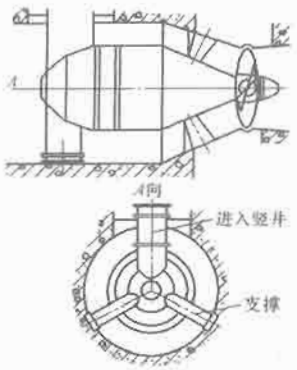


图 2.4-158 3点支撑

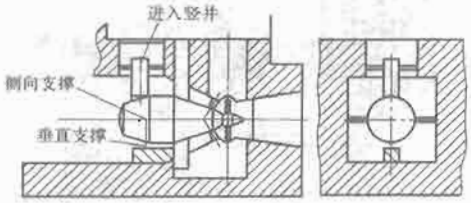


图 2.4-159 4点支撑(带大支墩和小支脚结构)

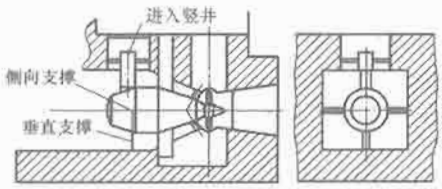


图 2.4-160 4点支撑

(见图 2.4-161)及不带基础大支墩(见图 2.4-162)两种结构，应根据机组流道水力设计确定。

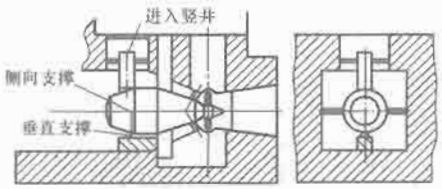


图 2.4-161 5点支撑(带大支墩和2个小支脚结构)

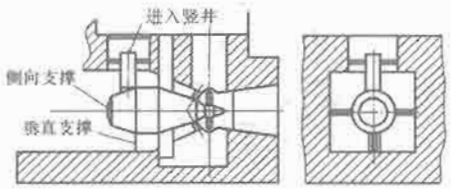


图 2.4-162 5点支撑(不带大支墩)

⑤ 上述灯泡体辅助支撑应采用球面支撑结构，允许灯泡体轴向和径向位移，以减小热胀产生的轴向力和水力不平衡产生的综合力。

7.2.2 主要结构部件

(1) 组合轴承

组合轴承是集正、反向推力轴承和径向轴承为一体的部件。它主要承受机组转动部件的径向载荷及水轮机正、反向水推力。为尽可能地使轴承结构更加紧凑，推力轴承和导轴承采用组合布置方式，如图 2.4-163 所示。根据推力轴承的安装位置，有两种布置方式。

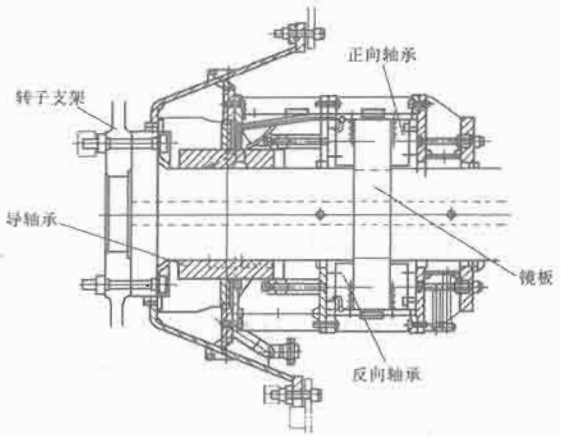


图 2.4-163 组合式轴承装配

1) 推力轴承与导轴承一起布置在转子的上游侧。其主要特点是：安装、检修比较方便，轴向载荷分配不均及通风冷却系统布置不便是关键难点，适用于中小容量机组。

2) 推力轴承与导轴承一起布置在转子的下游侧。其优点是：轴向载荷分配均匀；轴系挠度易满足要求；通风冷却系统便于布置。目前，已投运的灯泡式水轮发电机广泛采用这种布置方式，并具备成熟的设计、制造、安装、检修和运行经验。

(2) 轴承支架

整个组合轴承所承受的轴向和径向力，将通过轴承支架传递到水轮机管形座上。要求轴承支架具备足够的刚度和强度。并应用专用有限元软件对其进行详细的分析计算。轴承支架结构型式多为锥形筒式结构，如图 2.4-164 所示。

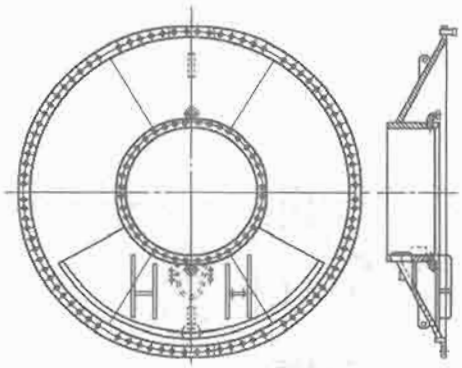


图 2.4-164 锥形筒式轴承支架

(3) 推力轴承

包括正向和反向推力轴承。正向推力轴承承受正向的水推力载荷，反向推力轴承承受机组出力减小和停机时的反向水推力载荷。通常反向水推力要比机组正常运行时的大，但前者为瞬间作用和非连续载荷。为预防轴电流，在转子上游侧的水轮机受油器支架底部以及受油器进、出油管法兰处(包括连接螺栓)，安装绝缘垫板、绝缘螺栓等。同时在发电机上游侧，还应装设轴电流报警检测装置。

1) 支撑方式。

① 刚性支撑。正、反向推力瓦均采用支柱螺钉支撑，如图 2.4-163 所示。结构简单、调整支柱螺钉的工作量较大。支柱螺钉可支撑到推力瓦背面的铬钢垫上(见图 2.4-165)，或在支柱螺钉和推力瓦之间设置一个托盘，在轴向负荷的作用下，使轴瓦的机械变形与热变形相互抵消，达到减小轴瓦变形的目的(见图 2.4-166)。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

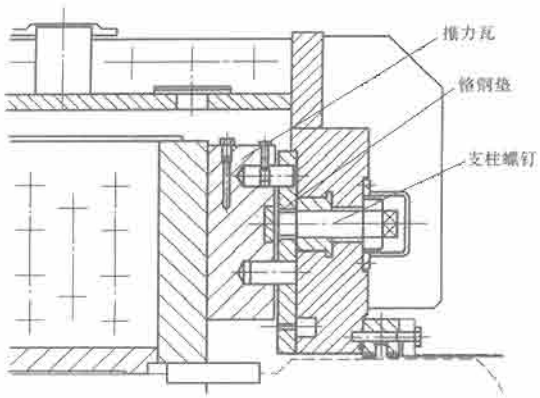


图 2.4-165 支柱螺钉加铬钢垫结构

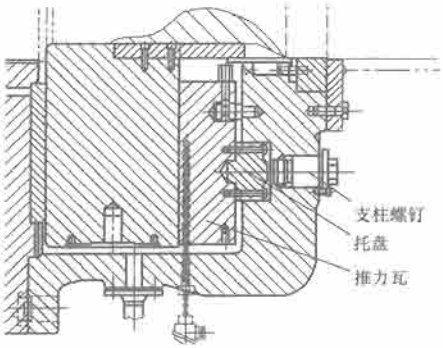


图 2.4-166 支柱螺钉加托盘结构

② 双托盘弹性梁支撑。推力瓦由互相搭接的弹性梁支撑，应用杠杆原理传递不平衡力，使各块推力瓦受力均匀，如图 2.4-167 所示。对弹性梁的材质要求较高，结构较复杂，同时对制造工艺以及公差要求也很严格。正、反向推力轴承均可采用此结构。

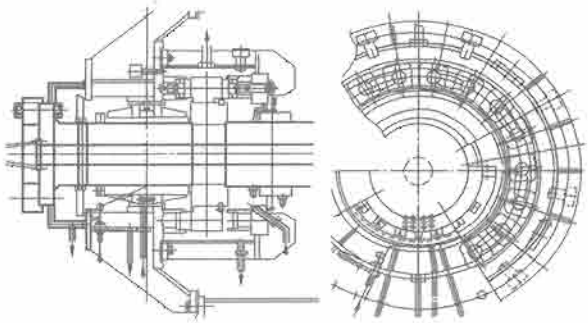


图 2.4-167 平衡梁支撑

③ 弹性垫支撑。主要应用于反向推力轴承的支撑。借助垫的弹性变形吸收瓦的不均匀负荷，并使瓦倾斜形成动压承载油膜。弹性垫为扇形、高硬度耐油橡胶板，厚度多为5mm。通常其几何尺寸与反向推力瓦的相同。该结构优点是安装维护简便，受材质限制，适用于推力瓦比压较小的机组。

④ 铜瓦支撑。无反向推力轴承瓦，以锡青铜瓦取代，其详细结构如图 2.4-168 所示。铜瓦采用分瓣结构，材质选用铸锡青铜。其优点是结构紧凑、简单，安装检修方便，但加工难度较大，易变形。一般采用整圆加工后再切割分瓣的工艺。

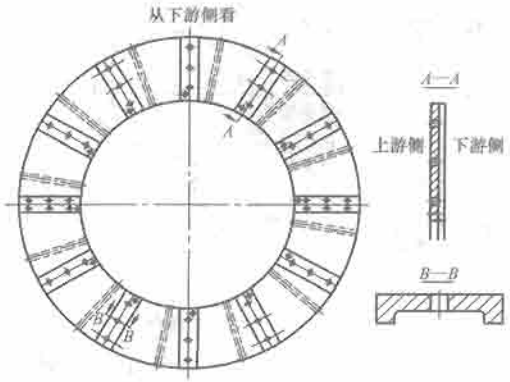


图 2.4-168 铜瓦结构

2) 润滑计算。根据给定的推力负荷和机组的转速，可计算并确定推力轴承的主要润滑参数，如瓦的块数、瓦夹角、内外径和长宽比及支撑位置等，参见本章第 5 节。

表 2.4-51 为典型灯泡式水轮发电机推力轴承主要技术数据。

3) 关键部件。

① 推力瓦。

(a) 正、反向推力瓦一般采用轴承(巴氏)合金瓦结构。轴承合金层的厚度一般为 3～4mm，瓦的周边修成 2mm 圆角，并在进油边处加工出楔形斜坡，以利机组起动时形成油膜。总结近年制造、安装和运行经验，高压油顶起装置已取消，仅在发电机导轴承和水轮机导轴承处设置高压油顶起装置。

(b) 另外，对正、反向推力轴承均采用弹性金属塑料瓦的运行机组，需进一步分析和研究其推广应用的实际意义。

表 2.4-51 典型灯泡式水轮发电机推力轴承主要技术数据

电站名称	P_N(MW)	n_N (r/min)	正向推力负荷 (kN)	反向推力负荷 (kN)	瓦块数 m	瓦夹角 α (°)	瓦厚度 (mm)	备注
江口	20	78.95	2940	5095	12	25.3	125	正向轴承带高压油顶起
凌津滩	30	78.95	6500	4400	18	15	70	
洪江	45	136.4	5390	5096	10	30	140	
株洲航电	28	65.2	3730	3730	10	28.8	150	
红花	38	107.1	4557	4557	12	25	125	
炳灵	48	107.1	7399	7987	12	25	180	
长洲	42	75	6377	8201	12	25.3	125	
安居	15	88.24	1980	3871	12	25.7	125	正向轴承3块瓦带高压油顶起
马迹塘	18.5	75	2078	4900	12	25	125	
马回	23	115.4	2900	2900	16	18.4	75	正向轴承带高压油顶起
大源渡	30	65.2	2000	4000	16(正向) 8(反向)	18.62	95	正向轴承带高压油顶起
康扬	40.75	125	4740	4740	12	25	125	
只见	65	100	6272		20	13	45+85	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

② 镜板。镜板应适应正、反两个推力轴承运行的要求，其主要结构型式有下列几种：

(a) 分瓣焊接镜板。镜板两个工作面的材质选用可焊性能较好的 25 锻钢。两个工作面通过合缝板及筋板焊成一体，如图 2.4-169 所示。合缝板螺栓将分瓣镜板把合成整圆并套于主轴上，通过平键传递扭矩。为减小镜板旋转时对润滑油的搅动，其外缘应装设围板。镜板工作面加工后的硬度值一般为 124～170HB，镜面硬度差值为 20 HB。应对重要焊缝进行探伤检验。

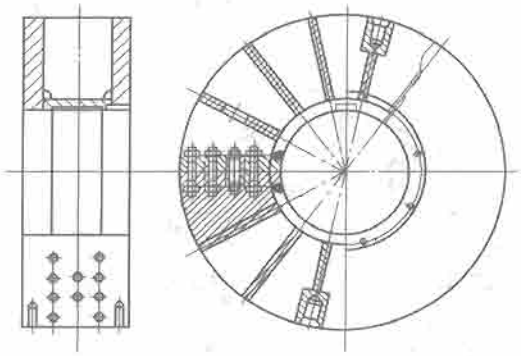


图 2.4-169 分瓣焊接镜板

(b) 分瓣整锻镜板。镜板的材质选用 55 锻钢，两瓣镜板把合成整圆并套于主轴上，通过平键传递扭矩。为减小镜板旋转时对润滑油的搅动，其外缘也应装设围板(见图 2.4-170)。该结构简单，整体刚度较好，镜面硬度值与立式机组推力轴承镜板的相似。

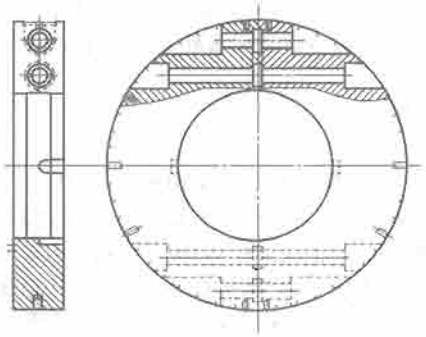


图 2.4-170 分瓣整锻镜板

(c) "无镜板"结构。推力瓦与主轴上的推力头直接接触，以轴身端面代替镜面实现对正、反向推力负荷支撑。该结构较紧凑，不存在分瓣镜板的组合错位及间隙问题，对接触面的平滑性和摆动度效果较好，如图 2.4-171 所示。但瓦的间隙测量及检修较困难，一旦发生轴瓦严重损伤，只能将主轴吊出进行修复。另外，该结构增加了主轴锻件的尺寸和重量及加工难度。

③ 导轴承(径向轴承)。机组的转动部分由 2 个(或 3 个)导轴承支撑。发电机转子和水轮机转轮均在导轴承的外侧，为双悬臂结构。发电机侧的导轴承与推力轴承组成一体构成组合轴承。需对轴系进行临界转速、振动响应及导轴承受力计算以及导轴承的润滑计算。(结构设计时，应首先选取径向轴承的支撑结构，其关键问题是主轴弯曲对径向轴承的影响)。

(a) 球面圆柱轴承支撑。圆柱轴承具有自调心性能，能自然适应主轴的倾斜，可减小轴在轴瓦中的不对中度，以增大最小油膜厚度。同时球面支撑部分还有一定的微调能力，极大改善径向轴承运行性能。比较发现，圆柱轴承的承载能

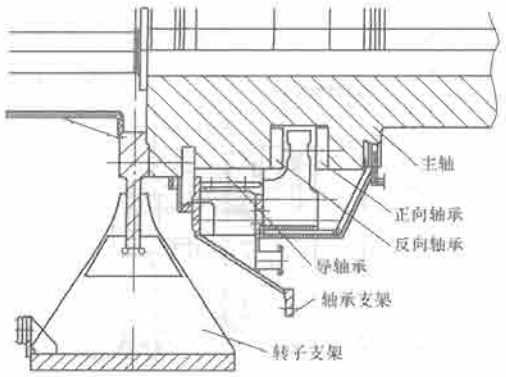


图 2.4-171 "无镜板"结构

力是最大的，如图 2.4-172 所示。另外，圆柱轴承具有结构简单、制造和维修简便、经济等特点。

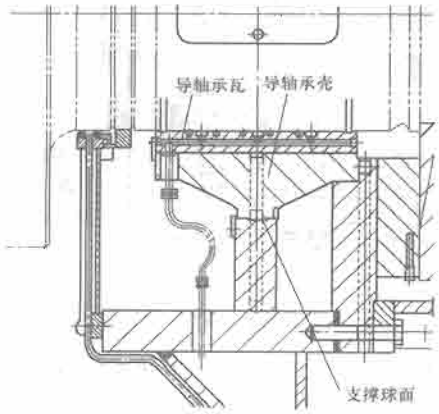


图 2.4-172 球面支撑导轴承

(b) 圆面圆柱轴承支撑。与球面圆柱轴承支撑结构类似，唯一区别是其支撑方式不是球面，而是圆面，如图 2.4-173 所示。其特点是可降低导轴承的制造难度，并简化安装程序。但导轴承适应主轴挠度变化的微调能力降低，对主轴安装时轴系调整的要求提高。为适应轴线倾斜，应在导轴承与轴承支架的组合面上装设配合片，根据计算的轴线挠度值选择配合片的楔形厚度。

(c) 分块可倾瓦支撑。

a) 对径向负荷大、转速低和偏心率较大的动力润滑轴承，当轴颈尺寸较大时，不宜采用筒式整体瓦，而应采用分块可倾瓦结构，如图 2.4-174 所示。

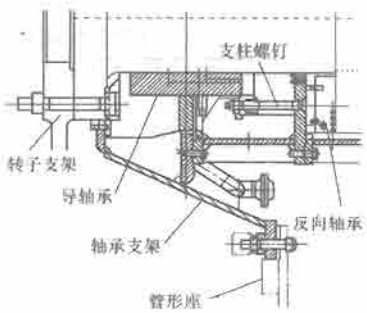


图 2.4-173 圆面支撑导轴承

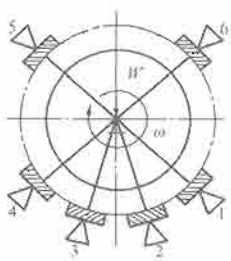


图 2.4-174 分块可倾瓦导轴承

b) 可倾瓦轴承性能受轴瓦偏心率、弹性变形、热效应、轴瓦刚度、压力分布、瓦面形线等因素影响。对大型机组可采用小包角瓦块及瓦块支点密集布置于轴颈下方即瓦块支点非均匀布置型式，以提高轴承的承载能力，改善其润滑性能。但瓦块弹性变形影响瓦面形线形状，从而影响可倾瓦轴

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

承的静态性能和动力特性。对低速重载或较大偏心率支撑，还应考虑瓦块三维弹性变形和热效应对轴承润滑性能的影响。

表2.4-52为典型灯泡式水轮发电机导轴承主要技术数据。

表 2.4-52 典型灯泡式水轮发电机导轴承主要技术数据

电站名称	导轴承负荷 (kN)	额定转速 (r/min)	轴瓦内径 (mm)	轴瓦宽度 (mm)	宽径比值	支撑型式	备注
江口	950	78.9	950	700	0.737	球面	
凌津滩	1088	78.9	910	900	0.989	球面	
洪江	1275	136.4	850	760	0.894	圆面	
株洲航电	2220	65.2	1150	750	0.652	圆面	
红花	1690	107.1	1100	830	0.755	球面	
红岩子	1470	83.3	1740	700	0.402	分块可倾瓦	6块瓦
炳灵	1813	107.1	1100	830	0.755	球面	
日本只见	1020 1235	100	1100 1100	900 900	0.818 0.818	球面 球面	3导轴承
安居	812	88.24	860	680	0.791	球面	
马迹塘	837	75	900	430	0.478	球面	
马回	720	115.4	800	480	0.6	圆面	
长洲	1900	75	1200	850	0.708	球面	
大源渡	1250	65.2	980	760	0.776	圆面	
康扬	1245	125	950	780	0.821	球面	

4）轴承润滑系统。轴承润滑系统分高、低压两套油路，由水轮机和发电机共用。

① 高压油路（高压油顶起油路）用于机组起动和停机过程。通过计算，确定径向轴承高压油室的尺寸、高压油流量、顶起压力以及顶起装置油泵组参数等。

② 低压油路向水轮机导轴承和发电机组合轴承提供运行时所需的润滑油。低位油箱中的润滑油通过油泵输出，经滤油器和油冷却器后进入高位油箱。其中油泵、电动机、滤油器、油冷却器等分别采用两套互为切换备用。高位油箱中的润滑油在自身重力作用下，向发电机组合轴承和水轮机导轴承供油，并满足在油泵发生故障时仍能向机组各个轴承提供5min的润滑油，保证机组安全停机。总供油管输出的润滑油一般情况下分3个支路，分别流入发电机导轴承和正、反向推力轴承及水轮机导轴承，之后汇入各个轴承的回油管排至低位油箱。

③ 如润滑系统中的油冷却器冷却水中断，机组可在额定工况下无损运行并能正常停机，无损运行的具体时间应在专用技术协议中规定。

④ 通常，应允许推力轴承和导轴承在轴承润滑油进油温度不低于20℃时起动。因此设计轴承润滑系统时，应在每个油箱上布置电加热器及信号温度计。当油箱内油温低于20℃时电加热器投入，高于25℃时电加热器退出。

7.2.3 定子

由机座、铁心、线圈、端箍、铜环引线、测温装置等零部件组成，其典型结构如图2.4-175所示。

（1）机座

1）主要材料为Q235钢板，用以固定铁心，是灯泡体的组成部分。其上游与中间环或冷却套通过螺栓连接，下游与水轮机管形座通过螺栓连接。机座承受自重及电磁扭矩，并将扭矩传递至水轮机的管形座上。下游侧环板与管形座环板应有足够数量的连接螺栓。机座与管形座结合面的静摩擦力应能承受突然短路切向力，必要时可增设销钉。

2）应具有满足机组安全运行要求的刚度，同时机座与铁心的结构还应能适应铁心的热变形，使铁心在热胀时不会对机座产生过大的压应力，引起铁心翘曲。

3）在满足运输条件下，应尽量采用整圆机座，以提高

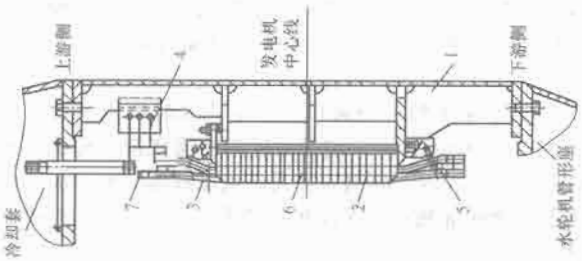


图2.4-175 定子装配

1—机座；2—铁心；3—线圈；4—铜环引线；5—端箍；6—测温装置；7—极间连接线

刚度。采用分瓣结构，宜选用大合缝板的装配结构，不采用在工地组焊的分瓣型式。工厂内组圆加工后，在合缝板上打上销子，安装场组圆后将与水接触的合缝处进行封水焊。常选用的分瓣数为2、3、4。

4）机座的结构型式有环板式定子机座、V形筋式定子机座、贴壁式定子机座。环板式定子机座结构简单，刚度好，在灯泡比允许的条件被广泛采用。当发电机转速较高、泡体直径较小时，贴壁式定子机座结构多被采用。其机座壁由厚钢板制成，铁心的一部分热量通过机座壁与河水进行热交换。由于贴壁式定子机座的刚度较小，均为整圆结构，定子现场安装应有防变形的措施。

5）机座内孔倾斜。对于双支点双悬臂结构灯泡贯流式机组，发电机转子由于自重原因，悬臂端产生一个挠度值。为避免形成楔形气隙，将定子机座大齿压板或下游侧环板加工成斜面，使叠装后的铁心内圆轴线与转子轴线重合。

6）机座通风结构。一般环板式定子机座在各层环板上开设通风孔，为轴向通风（见图2.4-176）。V形筋式机座借助V形筋两侧开的风孔进风，热空气沿V形筋自下游向上游流动（见图2.4-177）。

（2）铁心

1）磁路的主要组成部分并用以固定绕组，由扇形片、通风槽片、定位筋、齿压板、拉紧螺杆、固定夹等部件组成。

2）扇形冲片的材料为冷轧无取向磁性钢带，材料的磁特性应符合GB/T 2521--1996相关规定。定子扇形片的槽

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

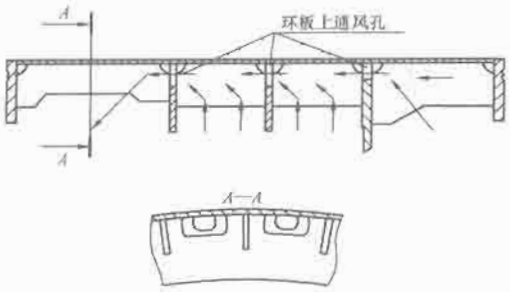


图 2.4-176 环板式机座通风示意

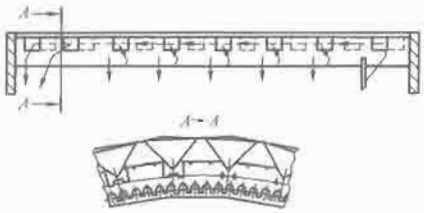


图 2.4-177 V形筋式机座通风示意

形尺寸由电磁计算确定，灯泡式发电机均采用开口槽。槽口楔部尺寸根据槽宽选定，楔高按槽楔的结构及强度确定。每片鸽尾槽数一般为2或3，使铁心叠装时定位好，叠片效率高。

3）对于采用轴径向通风的灯泡式水轮发电机，其铁心每段长度为30～55mm，定子通风沟由通风槽片构成。通风槽片多选用65W600硅钢片。为避免点焊热变形引起的扇形片齿部及槽底部翘曲，导致叠片错牙，需将扇形片扩槽，沿齿槽周边冲去2mm宽度。通风槽钢材质为非磁性的1Cr18Ni9Ti。

4）灯泡式发电机的转速较低，定子扇形片的轭部较窄，多采用铁心背部布置拉紧螺杆结构。大容量、高转速的机组（该类机组的定子轭部较宽）有采用穿心拉紧螺杆结构。定位筋的结构型式有单鸽尾和双鸽尾。铁心的片间压力一般选1.5～1.8MPa。

5）铁心外径一般较小，约为8500mm及以下。近年随着双鸽尾筋技术的应用，热胀引起铁心翘曲问题已基本解决，该结构能将铁心的热胀值和挤压应力值控制在允许的范围内。

6）灯泡式水轮发电机定子机座刚度小，多采用分数槽绕组。应对次谐波引发的铁心振动予以高度重视。并应合理选择机座刚度和立筋数量，严格保证铁心装压质量，如铁心两端采用黏接技术等。

（3）绕组

1）绕组的型式、导线规格及槽形尺寸等由电磁计算确定。线圈设计的任务是在电磁设计的基础上，进一步确定线圈的绝缘结构尺寸。常用的绕组型式有条式波绕组、叠绕组、圈式叠绕组。为减小股线温差及在槽漏磁场中不同位置产生循环电流而引起的附加损耗，条式线圈股线应在铁心长度范围内进行360°完全换位或不完全换位。

2）电机运行时，绕组承受电动力、热应力、机械力的综合作用，绝缘会老化。为此，线圈绝缘应有良好的电气、机械和防潮等性能，参见第1篇第5章。

3）定子线圈端部固定。线圈的出槽口高于压指处用槽口垫块塞紧，斜边部分用斜边垫块塞紧并绑扎牢固。下层线圈与端箍环绑扎牢固，使线圈的端部成为一体。常用的端箍材料有：1Cr18Ni9Ti无磁性钢环、玻璃钢、注胶玻璃丝绳。

4）定子铜环引出线从轴向引出。条式定子绕组支路数一般小于2。1条支路条式波绕组铜环层数为3～4层；2条支路条式线圈选条式叠绕组，便于铜环引出。铜环的交流电流密度一般取2.1～3.3A/mm²。应计及集肤效应及邻扰效应对铜环温升的影响，一般应小于80K。

5）定子主要技术数据见表2.4-53。

表 2.4-53　　定子主要技术数据

序号	电站名称	S_N (MVA)	U_N (kV)	I_N (A)	每极每相槽数	支路数	铁心内/外径 (mm)	铁心长度 (mm)	定子槽数	定子装配重 (t)	机座外径 (mm)	机座高度 (mm)
1	江　口	21.7	10.5	1195	2	1	6160/6600	1450	456	87.9	7550	2800
2	凌津滩	31.6	10.5	1736.5	1+1/2	1	6470/6940	1650	342	106	7700	3250
3	木　京	11.8	6.3	1078	1+3/4	1	5340/5680	1120	378	52.7	6500	2500
4	洪　江	47.4	10.5	2605	3	2	5310/5835	1900	396	89	6500	3100
5	丰　海	16.7	6.3	1527	1+8/11	1	4130/4590	1260	228	52.3	5190	2640
6	株　洲	31.11	10.5	1711	1+11/23	1	7750/8150	1470	408	107	9000	3000
7	下　福	18.3	10.5	1008	2+1/4	1	4860/5250	1470	378	58.9	5900	2900
8	红　花	44.71	10.5	2458.2	2+1/2	2	5930/6400	2070	420	117	7115	3620
9	康　扬	42.9	10.5	2359	2+3/4	2	5340/5835	2120	396	100.1	6500	3500
10	富津坝	22.2	10.5	1222	2+2/5	1	4820/5250	1430	360	65.1	5900	2900
11	JURALA（印度）	43.333	11	2274.4	2+7/10	2	6240/6700	2020	486	118.4	7400	3500
12	长　洲	45.652	13.8	1909.9	1+3/5	1	7710/8200	1660	384	133.2	8900	3350
13	大顶子山	11.957	6.3	1095.7	2	1	5320/5680	950	384	48	6500	2500
14	炳　灵	50.526	13.8	2113.9	1+3/4	1	6130/6700	1810	294	124	7530	3350

（4）风机及冷却器

1）灯泡式水轮发电机通常采用具有鼓风机的强迫空气密闭循环冷却系统。

2）风机是发电机冷却系统中的重要部件之一。其主要性能参数有：扬程（全压 p）、流量 Q、有效功率 N_e、轴功率 N、转速 n、效率 η 等。主要采用轴流或斜流风机。前者主要用于大容量机组，后者应用于结构空间较小、要求风量大、风压高的机组。

3）冷却器通常固定在中间环或冷却套上，布置在风机的前端，与导风筒、风机、挡风板组成一个密闭的空气通

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

道。目前广泛应用穿片式结构，冷却器的详细结构及设计参见本章第5.7节。

7.2.4 转子

由主轴、转子支架、磁轭及磁极等组成。发电机与水轮机共用一根主轴。根据机组径向轴承的数量及其安装位置，转子结构相应有所不同。当机组设有两个径向轴承时，一个设置在水轮机侧，另一个设置在发电机侧；当发电机侧径向轴承设置在转子下游侧时，转子为悬臂结构，已广泛应用于灯泡贯流式机组。设计时应充分考虑由重力引起的轴线挠度及交变应力的影响。

(1) 磁轭

发电机直径较小，转子支架与磁轭通常组焊成一体，以实心磁轭圈代替叠片磁轭，磁极直接固定在磁轭圈上。也有采用叠片磁轭的，其结构与立式水轮发电机的类似(参见本章第5节)。一般灯泡式水轮发电机转速较低，飞轮力矩值较小，因此，磁轭冲片宽度较窄。

(2) 转子支架

1) 对非叠片磁轭，转子支架与磁轭通常组焊成一体。按其结构特点可分为单圆盘式转子支架、双圆盘式转子支架、斜立筋式转子支架等。

2) 当转子直径较小、且长度较短时，可采用单圆盘式转子支架，如图2.4-178所示。支架由中心体、圆盘、立筋和磁轭圈焊接而成，结构简单。

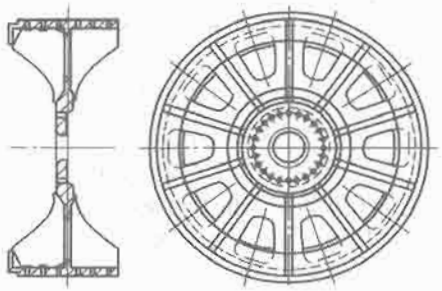


图2.4-178 单圆盘式转子支架

3) 当转子直径较大、长度较长时，可采用双圆盘式转子支架，如图2.4-179所示。支架由中心体、左、右圆盘、立筋和磁轭圈焊接而成，结构稍复杂；但安全可靠，可承受较大的转子重量和离心力。

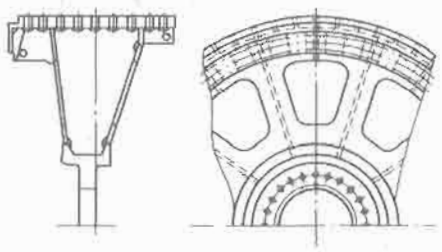


图2.4-179 双圆盘式转子支架

4) 斜立筋式转子支架没有圆盘，由中心体、立筋和磁轭圈组成，如图2.4-180所示。立筋与内部中心体和外部磁轭圈成一斜角布置。与圆盘式转子支架相比，其径向刚度相对较小，允许外部磁轭圈微小变形。立筋与内部中心体成一斜角连接，其连接处焊缝应力较大，焊接质量要求较高，必要时应打磨焊缝表面，降低表面粗糙度。

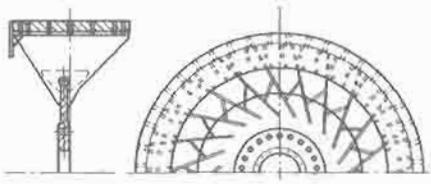


图2.4-180 斜立筋式转子支架

5) 单圆盘式、双圆盘式、斜立筋式转子支架均适用于在发电机侧设置一个径向轴承且位于转子下游侧、转子为悬臂结构的发电机。其共同特点是在转子支架中心只有一个法兰与主轴连接。如在转子上、下游两侧均设有径向轴承时，其结构则与立式机组的类似，两侧都有法兰分别与上、下游两端轴连接。

(3) 转子支架与主轴连接

转子支架下游侧直接与机组主轴连接。一般采用销钉传递扭矩，螺栓把合，止口定位。转子支架与主轴具备同镗销孔条件，传递扭矩的销钉可采用圆柱销结构，如图2.4-181所示。转子支架与主轴不具备联轴同镗销孔条件，可采用偏心销结构，如图2.4-182所示。其结构稍复杂，但允许转子支架销孔与主轴法兰销孔有一定不同心偏差。支架与主轴通过螺栓连接。由于转子下游侧空间较小，一般直接在主轴法兰上加工螺孔。主轴法兰材质强度一般较螺栓的低，因此，应核算主轴法兰螺孔强度，确定合适的固紧力矩。

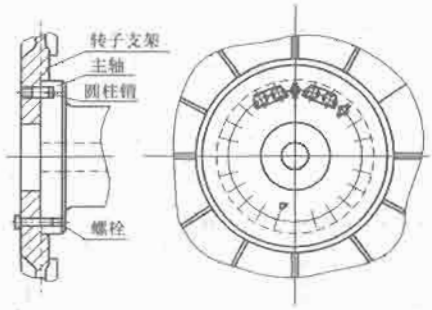


图2.4-181 转子支架与主轴连接
(螺栓+圆柱销)

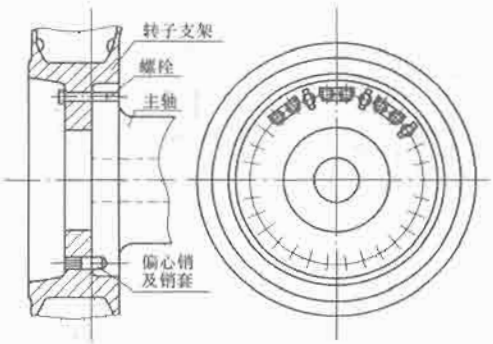


图2.4-182 转子支架与主轴连接
(螺栓+偏心销)

(4) 磁极

1) 磁极由磁极铁心和线圈等组成。磁极铁心采用薄钢板叠压而成，也可采用磁极极靴为薄钢板叠压、磁极极身为实心(整体)、叠片极靴与实心极身再焊接起来的结构。当采用叠片磁轭时，磁极相应采用"T"尾或鸽尾结构。一般磁极尺寸较小，铁心两端磁极压板通过方钢或圆钢固紧，如图2.4-183所示。

2) 磁极线圈结构与立式水轮发电机的类似，可采用铜排绕制或焊接结构。灯泡式发电机一般直径较小，极数较多，磁极极间距相对较小，通风散热比较困难。磁极线圈多采用带散热匝的结构，以增加线圈散热表面。图2.4-183中(a)、(b)、(c)、(d)四种磁极均采用带散热匝的线圈。应严格控制磁极线圈宽度，以满足极间良好通风及便于接线的要

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

求。采用焊接结构的线圈有利于控制线圈宽度偏差。当磁极极间距较大时，可采用铜排绕制的磁极线圈，以简化工艺，降低成本。

3）对具有磁轭圈的转子支架，采用高强度螺栓直接把磁极固定在磁轭圈外圆上。磁极铁心内的方钢或圆钢上的螺孔应与磁轭圈光孔的位置对应，结构简单、安装方便。为保证转子外圆尺寸，可在磁极与磁轭圈之间加设调整垫片，如图 2.4-184(a)、(b)、(c)所示。

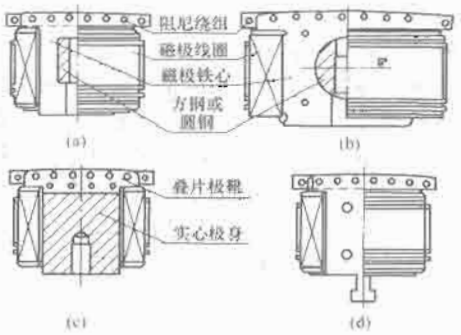


图 2.4-183 磁极结构
(a)内穿方钢的叠片磁极；(b)内穿圆钢的叠片磁极；(c)叠片极靴与实心极身组合结构磁极；(d)T尾磁极

4）对叠片磁轭，磁极采用T尾或鸽尾结构，并用键固定，与立式水轮发电机类似，如图 2.4-184(d)所示。

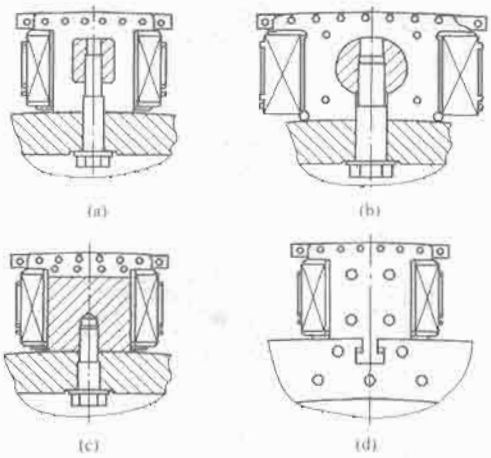


图 2.4-184 磁极固定
(a)内穿方钢叠片磁极用螺栓固定；(b)内穿圆钢叠片磁极用螺栓固定；(c)实心极身磁极用螺栓固定；(d)叠片磁极T尾固定

7.3 通风冷却系统

灯泡式水轮发电机的直径小、转速低，由转子和风扇等部件所产生的风压较常规水轮发电机的低很多。为此合理设计和选择通风冷却系统成为发电机设计的关键问题之一。

7.3.1 型式

(1) 常压自然通风冷却系统

1）由灯泡头、泡体、定子铁心、转子、推力轴承和发电机大轴等组成，如图 2.4-185 所示。这种型式的定子多采用贴壁结构，利用灯泡体壁外壳作为定子机座，定子铁心同灯泡体壁结合在一起，充分利用灯泡体外壁作为定子散热面，直接将热量传给河水。

2）定子铁心的热量主要从灯泡体壁外壳散出，铁心与

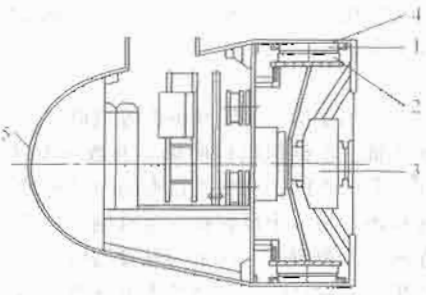


图 2.4-185 常压自然通风冷却系统
1—定子；2—转子；3—轴承系统；4—泡体；5—泡头

泡体壁的接触程度直接影响传热效果。两者之间的设计间隙应考虑外壳所承受的水压、温度升高后定子铁心热胀量及电机运行时所承受的磁拉力等因素，以保证电机运行时铁心与外壳的良好接触。贴壁结构常采用以下两种方式：

① 叠压好的铁心外径加工后，热套于泡体壁内壳。机组运行时铁心热胀，使两者保持良好接触。

② 沿泡体内壁叠装扇形冲片。为使铁心与泡体壁紧密接触，可在泡体壁与铁心的间隙内注入金属粉末。为防止铁心两端松动，可在定子铁心冲片表面涂敷热固化环氧树脂，叠装压紧后干燥固化。

3）贴壁结构充分利用泡体外壁作为定子散热面，直接将热量传给河水，可缩小发电机和灯泡体的直径(灯泡比)，使过流条件更好。

4）适用于容量为 500kW 及以下的灯泡式水轮发电机。

(2) 常压强迫轴向通风冷却系统

1）由灯泡头、泡体、机座、铁心、转子、鼓风机、推力轴承、发电机大轴和冷却器等组成，如图 2.4-186 所示。其定子铁心一般较短，磁轭无径向通风沟。

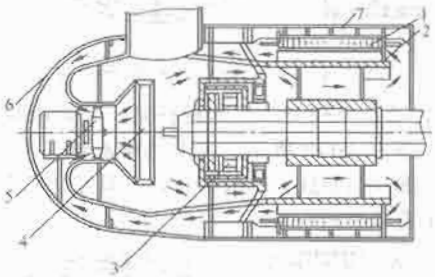


图 2.4-186 常压强迫轴向通风冷却系统
1—定子；2—转子；3—轴承系统；4—冷却器；5—鼓风机；6—泡头；7—泡体

2）定子多采用铁心贴壁或具有冷却翅片的双层筒结构。铁心和转子线圈的热量主要从外筒壁散出，散热能力较强。对容量较大的电机，为提高冷却效果，可在定子铁心轭部开轴向圆孔、齿部开窄的轴向通风槽，也可装设冷却器以增强热交换能力。鼓风机能提高通风冷却系统的压力，从而增大风量。冷却空气经冷却器冷却后，由鼓风机驱送到转子支架通风孔，进入下游侧，然后从磁极极间、气隙及定子铁心上的轴向通风孔等轴向风道流回冷却器，构成密闭强迫通风冷却系统。相对径向通风冷却系统，该结构简单、空气沿轴向温差较大、电机各部分温度分布不均匀。因此，适用于短铁心的灯泡式水轮发电机。

(3) 常压强迫轴、径向通风冷却系统

1）由灯泡头、泡体、机座、铁心、转子、鼓风机、推力轴承、发电机大轴、冷却器和挡风板等组成，如图 2.4-187

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

所示。与常压强迫轴向通风冷却系统相比，该系统更便于考虑通风部件的设计，是目前广泛采用的一种冷却系统。

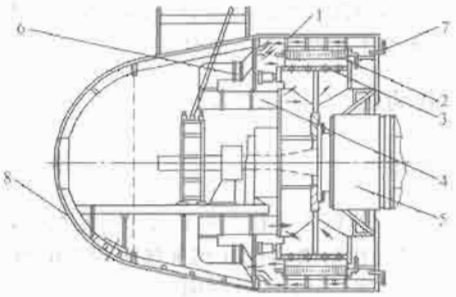


图 2.4-187 常压强迫轴、径向通风冷却系统
1—泡体；2—定子；3—转子；4—鼓风机；
5—轴承系统；6—冷却器；7—挡风板；
8—泡头

2）通风冷却系统装设有鼓风机，作为主要压力源。对大、中型灯泡式水轮发电机，其定子机座具有轴向V形筋（支撑结构）或在机座上开设轴向通风孔（铁心背部热空气的轴向流动）。根据风量分配，定子铁心段可分为等距和不等距两种。一般在风量分配较均匀的条件下，为简化制造工艺，铁心段采用等距结构。为提高磁极线圈的散热能力，磁极线圈采用散热匝结构。沿磁轭圆周开设径向通风孔，以增大冷却铁心和绕组的总风量。

3）冷却空气通过鼓风机压入电机内部，在转子支架、磁轭、磁极旋转产生的压力作用下，进入转子支架入口，流经磁轭通风孔、磁极极间、气隙、定子径向风沟；另一部分从磁极极间、气隙流入定子线圈端部，经机座壁环板通风孔，到冷却器进行热交换，再经鼓风机驱送到转子支架通风孔，构成密闭强迫循环通风冷却系统。另外，汇集到铁心背部的热风通过机座壁与河水进行热交换散去部分热量。

4）冷却器用水由河水提供，广泛应用于水质较好、水生物较少的大、中型灯泡式水轮发电机。

（4）常压带冷却套的强迫通风冷却系统

1）由灯泡头、冷却套、泡体、机座、铁心、转子、鼓风机、推力轴承和发电机大轴、冷却器等组成，如图2.4-188所示。

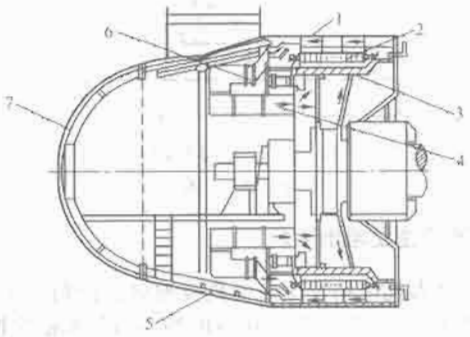


图 2.4-188 常压带冷却套的强迫通风冷却系统
1—泡体；2—定子；3—转子；4—鼓风机；
5—冷却套；6—冷却器；7—泡头

2）相对其他强迫通风冷却系统，只增加了循环供水冷却系统。在泡头与泡体之间的过渡段装设水-水冷却套。流过冷却器的冷却水经水泵泵入冷却套，通过外壁与河水进行热交换后，重新流入冷却器形成泡体内密闭循环。该循环系统具有辅助设备投资少，冷却水洁净，冷却器使用寿命长等优点，因而得到广泛应用。

3）冷却套由外壁与内壁组焊而成，内、外锥壁间为冷却水的过流通道。为使冷却水沿圆周有序流动，流道内一般采用隔块隔成若干流道分支。冷却水流过冷却套通过对流换热将热量传给河水。为实现外壁与河水间的良好换热，同时考虑河水中一些微生物及化学物质对冷却套的腐蚀，要求外壁表面光滑耐腐蚀。通常采用不锈钢材质，或采用不锈钢板与普通钢板复合而成的复合钢板。应定期清除钢板表面结垢和附着水生物。

4）该冷却系统采用冷却套作为二次冷却水循环系统的冷却部件，提供冷却器用水，广泛应用于河水温度低、水质较差、水生物较多的大、中型灯泡式水轮发电机。

（5）增压强迫通风冷却系统

1）由灯泡头、泡体、机座、铁心、转子、鼓风机、推力轴承、发电机大轴和冷却器等组成，如图2.4-188所示。

2）对大容量灯泡式水轮发电机，为提高冷却效果，减小风机容量，可采用增压强迫通风冷却系统。冷却介质为压缩空气。电机腔内的空气增压后可使灯泡比减小，机组的综合效率比一般灯泡式水轮发电机的要高。由于散热能力增强，空气冷却器尺寸可减小，或者取消空气冷却器。

3）需增设空气密封装置和充压设备，监测和维护工作量亦相应增加。停机时需减压，开机前再次充压，不便于运行人员进入泡体内检查和维护。

4）如发电机的风量和损耗为定值，则空气温升与机内空气的压力成反比。因而，增大绝对压力，可提高散热系数，降低定、转子温度。另外，增大压力可显著减小冷却电机所需的循环功率，减小鼓风机的容量。考虑风摩损耗，压缩空气的压力不宜取得过高，通常取0.2～0.3MPa（绝对压力）。

5）适用于无法采用常压强迫轴、径向通风冷却系统要求的大容量灯泡式水轮发电机。

（6）绕组直接水冷却通风冷却系统

1）由灯泡头、泡体、机座、铁心、转子、鼓风机、推力轴承和发电机大轴、冷却器等组成。与空气冷却灯泡式水轮发电机相比，其定子绕组设有流入一定冷却水的空心导线。

2）定子绕组直接通水冷却，转子磁极线圈及定子铁心等采用空气冷却。该系统冷却效果好，可保持定子绕组温度均匀分布。需要的风量小，相应风损也小。在满足规定GD^2条件下，可降低铁心高度，缩小体积，减轻重量。定子接头、水处理装置及冷却器等的可靠性、安装操作复杂、周期长及维护成本较高等问题应给予特殊关注。

3）适用于电磁负荷较高的大容量灯泡式水轮发电机。

7.3.2 发热冷却计算

（1）计算要点

1）通风计算。由于系统内冷却空气过流情况十分复杂，边界条件不易确定，所以一般都简化为带有集中参数的等值风路求解。根据电机结构，建立通风冷却计算网络。建立各节点的多个支路元件的线性方程矩阵，进行求解。计算电机的总风量及风量分配，分析各部分压力升高及下降原因，选择合理的工作点，并应用后处理功能，在计算网络上显示流量、流速、压力等变量。参见本章第6节。

2）冷却器性能计算。应根据发电机产生的损耗及风量确定冷却器的尺寸和台数，并计算确定冷却器的性能参数。冷却器应有最佳传热系数和散热面积。

3）通风损耗。通常采用如下公式计算支路通风损耗

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$\Delta P_V(L) = Z(L)\rho V^2(L)/2 + S(L)Q(L) \quad (2.4\text{-}27)$$

式中，$\Delta P_V(L)$为支路 L 的通风损耗，kW；$Z(L)$为支路 L 阻力系数；$V(L)$为支路 L 流体流速，m/s；$S(L)$为支路 L 的风压源，MPa；$Q(L)$为支路 L 的流量，m^3/s；ρ为空气密度，kg/m^3。

通风损耗为所有支路通风损耗之和，即

$$P_V = \sum \Delta P_V(L) \quad (2.4\text{-}28)$$

4）温升计算。目前采用热网络法计算温升。热网络法运用局部集中参数观点构成等效热网络，确定网络参数(包括支路热阻、网格损耗的计算以及边界条件的处理)，以网格节点温度作为求解变量，根据能量守恒定律或直接应用基尔霍夫热流定律列出网格节点的温度方程组求解。

5）三维温度场。

① 传统的热网络法只能计算铁心和线圈的平均值，无法全面了解温度分布及最热点的位置，而应用有限元法可解决这一问题。利用几何元素和布尔运算操作生成基本的几何形状，在建立实体模型同时划分网格来生成节点和单元。再定义面与面的接触单元、自由度耦合及约束方程等。

② 边界条件的确定对计算结果有重要影响。通风沟选用第三类边界条件，即已知与边界面直接接触的流体温度和边界面与流体之间的对流换热系数。计算中考虑了材料的三维各向异性及附加损耗集肤效应，以保证定子温度场计算的准确性。

(2) 冷却系统主要结构

1）机座壁环板通风孔尺寸确定。环板通风孔是控制发电机风量分配的关键部位。通过不断调整通风孔尺寸，使之与定子风沟数合理匹配直至获得满意的风量分配。

2）轴流风机选择。首先计算通风冷却系统的阻力特性，然后根据工作点的压力及流量，确定所需的轴流风机外特性，最终选择合适的轴流风机。

3）磁轭通风孔。其结构尺寸直接影响径向风量和风量分配。设计时，应综合考虑机组的容量和极数确定磁轭通风孔沿轴向的段数。

4）转子支架通风孔。其结构尺寸的选取应以减小压头损失为主，尽量减小不必要的通风损耗。另外，多数转子支架通风孔还作为进入下游侧检修的进入孔，应考虑方便人进出。

5）挡风板。为避免漏风、旋涡等引起风摩损耗增加，通常在上、下游侧均安装挡风板，使空气流动顺畅。

6）冷却水循环系统。

① 河水直接冷却系统。由水泵、过滤装置、冷却器等组成，为开启式运行方式。河水经粗略过滤后作为冷却水直接供给冷却器将发电机损耗热带走。其特点为结构简单、使用方便、投资少、冷却水管易堵塞等。另外，河水中大量的微生物及化学物质易致冷却水管腐蚀破裂而影响发电机正常运行。该系统适用于河水洁净、发电机空间大、冷却器易于拆装的电站。

② 净水外循环系统。由水泵、冷却器、辅助散热装置(如火电厂的凉水塔等)组成。纯净水经水泵进入冷却水管，再进入辅助散热装置，然后重新进入水泵形成泡体外循环。其特点为冷却水纯净，冷却器散热能力强，运行安全可靠，辅助设施投资大，管理困难，目前很少采用。

③ 净水内循环系统。在发电机的泡头与泡体之间的过渡段装设水——水冷却套。冷却水流入冷却器经水泵进入冷却套，通过其外壁与河水进行热交换后，重新进入冷却器形成泡体内密闭循环。其特点为辅助设备投资少、冷却水纯净、冷却器使用寿命长、应用广泛。应高度关注冷却套外壁结垢和水生物附着问题。水泵是冷却器和冷却套的中间环节，为满足发热冷却要求，应充分利用冷却套的散热表面，合理地选择水泵工作点压头及流量。

8 发电电动机

8.1 设计特点

1）发电电动机的主要技术参数选择参见本章第 2 节。

2）发电电动机的结构设计和常规水轮发电机的基本相同。对于旋转部件、风路元件和轴承等部件设计，应考虑满足电机双向运行的要求。

8.2 推力轴承

与常规发电机推力轴承相比，其周向支撑在推力瓦中心位置，以满足推力瓦双向运行要求。参见第 5 卷《水力发电工程》第 7 篇第 6 章。

8.3 通风冷却系统

参见第 5 卷《水力发电工程》第 7 篇第 7 章。

8.4 起动与工况转换

8.4.1 起动方式

发电电动机的电动机工况有多种起动方式可供选择，利用同轴水轮机起动的方法很少采用。应综合考虑机组的飞轮力矩、电网允许压降及技术经济指标等因素选择合理的起动方式。表 2.4-54 为各种电气起动方式特点比较。

8.4.2 工况转换

发电电动机的基本运行工况为发电、发电调相(进相)、抽水、抽水调相和静止 6 种。各种运行工况及其相互转换关系如图 2.4-189 所示，参见第 5 卷《水力发电工程》第 7 篇第 8 章。

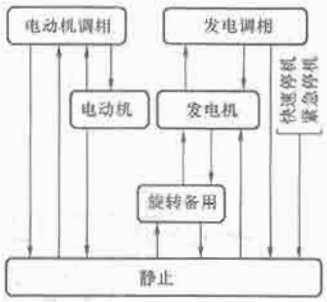


图 2.4-189 发电电动机运行工况及其相互转换关系

8.5 交流调速发电电动机

1）抽水蓄能电站发电电动机变速运行的目的是解决工作水头(扬程)变幅较大时，机组的经济运行和稳定性问题。所谓变速运行，系指机组能在额定同步转速附近一定范围内无级变速运行，与变极电机的双转速切换运行具有本质的区别。

2）变速运行的主要优点：

① 水轮机工况可在很宽的负荷及水头范围内保持高效率运行。

② 能调节水泵工况的输入功率。

③ 可更有效地控制无功功率。

④ 可充分利用水库库容，优化土建工程设计。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

⑤ 利用发电机转子的惯性，快速释放或吸收有功，抑制电网频率波动，发挥稳定电网的重要作用。

⑥ 不需要另配水泵起动装置。

3）基于近20年的技术进步和发展，目前实现发电电动机变速运行主要有两种方式：一是使用同步电机，在电机定子与电网之间连接静止变频装置；二是使用双馈绕线转子异步电机，在其转子回路中串联一套循环换流器，或一套门极可关断晶闸管换流器，为转子绕组提供三相变频励磁电流，参见第5卷《水力发电工程》第7篇第9章。

表 2.4-54 各种电气起动方式特点比较

起动方式	辅助电动机起动	异步起动	背靠背起动	变频器起动
原 理	由同轴电动机拖动至同步转速	由阻尼绕组产生的异步电磁转矩拖动至同步转速	由其他发电机提供变频电流同步起动	由变频起动装置提供变频电流同步起动
设备容量(%)	5～15	60～120	15～20	6～8
起动时间(min)	3～7	1～3	2～4	3～7
对系统影响	小	大	无	小
成本增加	较大	较小	小	大
占用空间	较大	较小	小	大
适用范围	台数少、容量大	中小容量	多为备用方案	台数多、容量大

9 振动

9.1 振动原因及条件

1）设计、制造或安装不良都会导致发电机电磁不平衡、机械不平衡或水力不平衡，从而引发机组振动。定子铁心的电磁振动会加剧定子绕组绝缘的电腐蚀和磨损，甚至造成发电机部件的疲劳破坏；机械不平衡直接影响机组轴系的稳定性；水轮机水力不平衡引起转轮叶片、导叶气蚀，水流流态紊乱，压力脉动增大，引发水体振动等。

2）应特别指出，在机组的结构设计中，首先要计算分析包括上端轴和全部轴承及所有重叠荷载在内的机组轴系动态稳定性、刚度和临界转速。根据机组动荷载频率、水轮机流道压力脉动和卡门涡频率、输水钢管流道中的压力脉动频率等，验算发电机主要部件的固有振动频率应与上述频率及电网频率是完全避开的，不致产生共振。

3）水轮发电机组产生振动的主要原因或条件、特点、预防和消除措施分别见表2.4-55～表2.4-58。

9.2 振动标准

机组振动评价标准是在总结国内外机组振动研究、运行经验、现场测试和分析基础上确定的。对装有导轴承的立式水轮发电机轴线调整完毕后，机组各部盘车摆度值应不超过表2.4-59的要求。盘车摆度计算示例见表2.4-60和图2.4-190。在正常稳定运行工况下，水轮发电机组各部分振动允许值应不超过表2.4-61的规定。

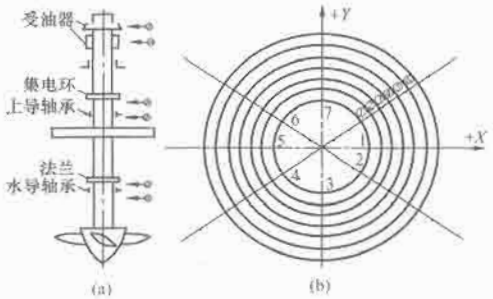


图 2.4-190 盘车摆度测定部位和记录示意
(a)测定部位；(b)测点记录示意

表 2.4-55 水力振动的原因及预防和消除措施

振动原因或条件	振动现象和特点	测试部位及设备	预防和消除措施
水轮机尾水管涡带引起的压力脉动及空腔气蚀	在低负荷或过负荷工况下运行振动大。有涡带撞击尾水管壁的轰隆声和冲击声	在轴承支架处用测振仪测量机组的振动	在水轮机尾水管安装补气管采取补气措施
叶道涡、卡门涡的频率与固定导叶或转轮叶片的频率相近	发生共振		修正叶片形状，改变叶片的固有频率
固定导叶后部紊流	某一负荷下振动较大		改变固定导叶和活动导叶相对位置，修正固定导叶尾部形状
转轮叶片数与导叶个数匹配不当；转轮与导叶间的距离及转轮与迷宫环的间隙不良	振动随负荷增大而增大		改变转轮叶片数，加大轮叶和导叶间的距离
水轮机在非设计工况运行造成尾水管空腔气蚀破坏	引起承重机架和主轴低频径向振动		计算确定机组振动区的范围和特点，优化运行方式，合理分配机组间负荷

表 2.4-56 机械振动的原因及预防和消除措施

振动原因或条件	振动现象和特点	测试部位及设备	预防和消除措施
主轴弯曲或有挠度 推力轴承调整不良 主轴法兰紧固不良 机组中心不正 轴承密封过紧 轴承间隙过大	在空载低速运行时振动大，振动频率以转频为主，即 $f=\frac{n_N}{60}$	在发电机和水轮机导轴承支架以及法兰处分别用测振仪和千分表测量机组的振动和摆度	严格保证机组制造和安装质量，加强对部件的检查试验
	振动随负荷增大而增大		

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

振动原因或条件	振动现象和特点	测试部位及设备	预防和消除措施
材质不均匀及制造安装误差引起转子动不平衡	空载时，发电机的摆度，振动与转速的二次方成正比变化，产生转频振动	设置完整的实时的监测与保护系统(包括传感器及数据采集与处理系统)	采用时域分析和频域分析相结合的动平衡方法作转子动平衡
定子铁心装压不紧	运行时有振动响声。空转时振动小，空载时振动随励磁电流的增加而加剧。振动频率有 50Hz 及 100Hz 等	用测振仪测量定子铁心两端和外圆的径向及轴向振动	保证定子铁心装压质量
分瓣机座合缝铁心间隙大	空载时，振动随励磁电流的增长和转速的上升而加剧，却随定子铁心温度的上升而减小，振频以 100Hz 为主	在定子铁心外圆和合缝处用测振仪测量机组的径向振动	检测铁心合缝间隙，如间隙为 h 时，绝缘垫块的厚度应为 $h+(0.4\sim0.5)$mm
发电机转子不圆、励磁绕组匝间短路及定转子磁场轴心不重合等	发电机由空载到负载振动加剧，并且与转速成正比变化，属于低频振动，振频为 $f=\frac{n_N}{60}k$ $(k=1,2,3,\cdots)$	在定子铁心外圆和机座壁上用测振仪或谐波分析仪等测量机组径向和轴向振动	严格保证机组制造和安装质量，加强对部件的检查试验
承重机架的固有频率与水轮机的振动频率，水力脉动频率和倍频，不对称运行时与定子铁心的振动频率，或与电网频率和它的倍频，或与建筑物的振动频率相近	共振导致振动和噪声加剧	在上、下机架上用测振仪或谐波分析仪等测量机架径向和轴向振动	结构设计时，对上下机架的刚强度及振动特性进行有限元分析，使它的垂直振动固有频率避开水轮机流道压力脉动和卡门涡频率、固定导叶及转轮叶片的激振频率

表 2.4-57　　电磁振动的原因及预防和消除措施

振动原因或条件	振动现象和特点	测试部位及设备	预防和消除措施
定子铁心内圆不圆或定子分数槽绕组的次谐波磁动势和主磁场相互作用	空载时振动幅值较小，但却随负载电流增加而成正比增加 振频 $f=2f_1k$，$f_1=50$Hz，$k=1,2,3,\cdots$，以 100Hz 为主	在定子铁心外圆和机座壁上用测振仪或谐波分析仪等测量机组径向和轴向振动	正确选择分数槽绕组，提高制造及安装质量。对分数槽绕组，应进行铁心电磁振动分析计算
定子并联支路环流产生的磁动势和主磁场相互作用	空载时打开并联支路，发电机的振动减小，当并联支路闭合后，振动随励磁电流的增加而加剧。振频以 100Hz 为主		布置定子绕组接线时，应尽可能使各支路绕组沿圆周分散连接
极靴形状问题由负序电流、整流器负荷引起的三相不平衡定、转子间气隙不均匀	振动和噪声随负荷增大而增大		使用精度高、测值稳定的测圆架对转子磁极圆度进行精确测量
磁拉力不平衡，定子铁心合缝处松动	加励磁时产生振动 主要频率 $f=\frac{n_N}{60}$ (Hz)		严格保证机组设计、制造和安装质量。运行中加强对部件的振动监测

表 2.4-58　　其他方面的振动

振动原因或条件	振动现象和特点	测试部位及设备	预防和消除措施
发电机通风系统不对称，盖板和挡风板刚度偏小	一般是盖板和挡风板等支撑部件发生振动，并且振动频率较高	用测振仪测量盖板的轴向振动	应注意定子铁心两端挡风板及转子支架挡风板结构布置、刚强度计算和尺寸选择，使风路系统对称
由漂浮物引起	大量落叶混入水中会产生主轴摆动	用测振仪测量主轴的摆度	这种振动，过了落叶期就自然消失了
由脱流引起	脱流现象		设置调压井以及甩负荷时延缓调速器关闭速度

表 2.4-59　　机组轴线的允许摆度值（双振幅）

轴　名	测量部位	摆度类别 (mm)	轴转速 n_N (r/min)				
			$n_N<150$	$150\leqslant n_N<300$	$300\leqslant n_N<500$	$500\leqslant n_N<750$	$n_N\geqslant750$
发电机轴	上、下轴承处轴颈及法兰	相对摆度	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
水轮机轴	导轴承处轴颈	相对摆度	0.05	0.05	0.04	0.03	0.02
发电机轴	集电环	绝对摆度	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10

注　1. 绝对摆度：指在测量部位测出的实际摆度值。
2. 相对摆度：绝对摆度 (mm) 与测量部位至镜板距离 (m) 之比值。
3. 在任何情况下，水轮机导轴承处的绝对摆度不得超过以下值：
转速在 250r/min 以下机组为 0.35mm；
转速在 250～600r/min 以下的机组为 0.25mm；
转速在 600r/min 及以上的机组为 0.20mm。
4. 以上均指机组盘车摆度，并非运行摆度。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 2.4-60 盘车摆度计算示例 单位：mm

测量部位		1	2	3	4	5	6	7	8
上导轴承处		−0.01	0	0	0	−0.02	−0.02	0	+0.01
法兰处		+0.07	+0.07	+0.07	+0.11	+0.18	+0.20	+0.15	+0.07
水轮机导轴承		+0.10	+0.06	0	−0.06	−0.07	−0.04	0	0
相对点		1～5		2～6		3～7		4～8	
全摆度	上导轴承	0.01		0.02		0		−0.01	
	法 兰	−0.11		−0.13		−0.08		0.04	
	水导轴承	0.17		0.10		0		−0.06	
净摆度	法 兰	−0.12		−0.15		−0.08		+0.05	
	水导轴承	0.16		0.08		0		−0.05	

表 2.4-61 水轮发电机组各部分振动允许值 单位：mm

机组型式	项目		额定转速 n_N (r/min)				
			$n_N<100$	$100\leqslant n_N<250$	$250\leqslant n_N<375$	$375\leqslant n_N<750$	$n_N\geqslant750$
立 式	水轮机	顶盖水平振动	0.09	0.07	0.05	0.03	按专用技术协议
		顶盖垂直振动	0.11	0.09	0.06	0.03	
	水轮发电机	带推力轴承支架的垂直振动	0.08	0.07	0.05	0.04	
		带导轴承支架的水平振动	0.11	0.09	0.07	0.05	
		定子铁心部位机座水平振动	0.04	0.03	0.02	0.02	
		定子铁心 100Hz 的双幅振动值	0.03	0.03	0.03	0.03	
卧 式	各部轴承垂直振动		0.11	0.09	0.07	0.05	
灯泡贯流式	推力支架的轴向振动		0.10	0.08			
	各导轴承的径向振动		0.12	0.10			
	灯泡头的径向振动		0.12	0.10			

注 振动值系指机组在各种正常稳定运行工况下测得的最大双振幅值。

10 安装

10.1 一般安装程序

水轮发电机的安装程序，主要根据结构型式确定，同时也与工地的施工条件、土建进度、设备到货情况和场地布置等客观条件有关。在保证安装质量的前提下，应尽量采取与土建及水轮机的安装实行平行交叉的施工方案，充分利用现有场地及施工设备，进行大件预装配，然后再把预装配好的大件按顺序分别吊入机坑进行总装，以缩短安装直线工期，争取早日发电。

10.1.1 悬式和伞式水轮发电机部件预装配

1）定子组装。大型分瓣定子在安装间（或机坑内）进行定子机座焊接，定位筋挂装，铁心装压，铁心磁化试验，定子机坑内嵌线（对工厂已嵌线的分瓣定子，在机坑内组合后先嵌合缝线棒），线棒接头焊接，绝缘盒灌注、定子交、直流耐电压试验等。

2）转子组装。主要工作有铁（冲）片清洗分类、转子支架焊接、磁轭装压、热打键、磁极挂装、转子交流耐电压试验等。

3）推力轴承预装。主要包括推力轴承支撑和负荷机架的预装、推力轴承瓦装配、镜板装配、推力头装配、油槽装配、油冷却器及挡油板装配。

4）上机架及下机架预装。包括支臂和中心体的组合焊接、预装盖板、安装上机架挡风板及灭火水管、预装导轴承油冷却器及挡油板。

5）制动器及其管路系统的安装。制动器分解检查和压力试验，制动器及其管路系统的安装和试验。

10.1.2 悬式水轮发电机一般安装程序

1）基础埋设。主要有下风洞盖板的基础件、下机架及定子基础垫板、制动器基础垫板、上机架千斤顶基础垫板等。

2）定子安装。在定子机坑内组装定子及嵌线，调整中心、高程、水平，安装空气冷却器。为减少与土建及水轮机安装的干扰，中小型定子也可在机坑外进行定子的组装及嵌线，待下机架吊装后，将定子整体吊入找正。

3）吊装下部风洞盖板。按水轮机主轴中心找正和固定。

4）下机架安装。组装成整体的下机架吊放在基础上，按座环中心或水轮机主轴中心找正并调高程及水平，浇筑基础混凝土。

5）转子安装。将安装间组装好的转子吊入定子，按水轮机主轴中心、高程进行调整；检查发电机空气间隙，校核定子中心，浇筑定子基础混凝土。

6）上机架安装。组装好的上机架吊放于定子或基础上，按发电机主轴调整中心、高程及水平并固定。

7）推力轴承安装。吊装推力轴承支撑，调整镜板高程及水平，推力头安装，推力头与镜板连接，将转子落到推力轴承上，初步调整推力轴承受力，发电机单独盘车，调整发电机轴线，测量和调整法兰盘摆度。

8）发电机主轴与水轮机主轴连接。

9）机组整体盘车。测量和调整机组总轴线。

10）推力轴承受力调整。

11）转动部分的调整和固定。安装各部导轴承瓦，按水轮机迷宫环间隙调整并固定转子中心位置，确定各部导轴瓦

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

的间隙，检查转动部分与固定部分的各部间隙。

12）辅助设备的安装。集电环、梯子拦杆、盖板、油水管路、自动化元件等的安装。

13）全面清扫、喷漆、检查。

14）轴承注油。

15）起动试运行。

10.1.3 伞式水轮发电机一般安装程序

可参照悬式发电机安装程序，但在吊装下机架后，应进行推力轴承的安装。

10.2 定子装配

中、小容量立式水轮发电机定子装配主要工序：分瓣定子组合，定子合缝处嵌线，接头焊接，端部绝缘包扎，定子绝缘交、直流介电强度试验。对直径较大、铁心较长的大型发电机定子，可在工地进行定子机座组焊、铁心装压和嵌线。

10.2.1 定子组合工艺及要求

1）利用专用工具竖立分瓣定子，以防损伤定子铁心和线圈。定子组合时，要均匀把紧螺栓，以保证铁心合缝处的紧密度。

2）定子组合螺栓把紧后，应测量机座合缝板及铁心合缝面的接触情况。一般加垫厚度应比实际所测间隙大0.4mm。定子合缝板接触面积应不小于70%。上下端间隙不大于1mm。

10.2.2 分瓣定子合缝嵌线

1）端箍连接及绝缘包扎。合缝处端箍连接，主要采用焊接结构，材质为无磁性钢，需用无磁性焊条。

2）条式线圈合缝嵌线。

① 嵌线前槽底放好半导体垫条，按图样要求将测试后的测温电阻温度计放入槽内。当下层线棒嵌入槽内后对线棒位置应加以校正，使线棒处于要求的位置。

② 将适形材料垫于端箍上，线棒与端箍靠紧并绑扎牢。

③ 检查线棒与铁心齿槽的接触情况，即在100mm范围内，间隙不得大于0.3mm，否则应塞入涂有半导体漆的环氧玻璃布垫片。要求表面电位不大于10V。

④ 嵌完下层合缝线棒后，按图样要求垫好端部间隔垫块，并用浸渍玻璃丝带连同线棒绑扎牢。

⑤ 下层线棒进行绝缘交流介电强度试验。

⑥ 上层线棒嵌线前，按图样要求垫入层间半导体垫条及测温电阻温度计。

⑦ 上层线棒进行绝缘交流介电强度试验。

3）打槽楔。

① 槽楔由上端打入，每对斜槽楔其楔板大头朝上并向下打紧。

② 注意槽楔通风口方向，应与铁心通风沟一致。

③ 打入槽楔过程中应垫入厚度适中的半导体垫条，以防槽楔松动。

④ 对槽楔紧度要求：用2.2～9.8N的小锤轻轻敲击槽楔，每块槽楔允许空隙的长度，应不超过槽楔长度的1/3。

10.2.3 工地叠片和嵌线定子

1）机座应符合各半径的绝对尺寸偏差不大于±2mm。

2）定位筋安装应符合下列要求：

① 安装前应校直。径向和周向的直线度不大于0.1mm/m。

② 定位筋全部焊接后，定位筋的半径与设计值的偏差，应在设计空气间隙值的±2%以内，最大偏差值不超过设计值的±0.5mm；相邻两定位筋在同一高度上的半径偏差不大于设计空气间隙值的0.6%；同一根定位筋在同一高度上因表面扭斜而造成的半径差不大于0.10mm。

③ 定位筋在同一高度上的弦距与平均值的偏差不大于±0.25mm，但累积偏差不超过0.4mm。

3）定子铁心叠片应符合下列要求：

① 叠片过程每张冲片均匀布置不少于2根槽样棒和制造厂要求的槽楔槽样棒定位，并用整形棒整形。

② 根据叠片分段压紧后测量的铁心高度和波浪度的偏差，在每段叠片中按偏差值不大于0～1mm，用制造厂规定的方法进行高度补偿。

③ 铁心的叠片高度应考虑整体压紧和热压的压缩量，一般热压的压缩量宜根据铁心高度的0.2%～0.3%考虑，并且平均分配到每一叠片段中。

④ 叠压过程应经常检查并调整铁心圆度。

4）定子铁心压紧应符合下列要求：

① 铁心外侧的压紧螺栓应与铁心保持2mm以上的间距。

② 铁心应进行分段和整体压紧，一般每段不宜超过600mm。

③ 采用测量均匀分布的压紧螺杆伸长的方法核对压紧的平均压力，整个圆周上测量的螺杆数不得少于10根。

④ 有热态压紧要求的定子铁心，应在铁心整体压紧后、铁心磁化试验前进行。

⑤ 铁心试验前、后应检查穿心螺杆对地绝缘。

5）定子铁心组装后应符合下列要求：

① 铁心圆度测量。按铁心高度方向每隔1m左右，分多个断面测量，每断面不少于16个测点。各半径与设计半径之差不超过发电机设计空气间隙的±4%。

② 在铁心槽底和背部均布的不少于16个测点上测量铁心高度，各点测量值与设计值的偏差应不超过表2.4-62的规定。一般取正偏差。

表2.4-62 定子铁心各测点高度的允许偏差 单位：mm

铁心高度 h	$h<1000$	$1000\leqslant h<1500$	$1500\leqslant h<2000$	$2000\leqslant h<2500$	$h\geqslant 2500$
偏 差	−2～+4	−2～+5	−2～+6	−2～+7	−2～+8

③ 铁心上端槽口齿尖的波浪度应不大于表2.4-63的规定。

表2.4-63 铁心上端波浪度允许值 单位：mm

铁心长度 l	$l<1000$	$1000\leqslant l<1500$	$1500\leqslant l<2000$	$2000\leqslant l<2500$	$l\geqslant 2500$
波浪度	6	7	9	10	11

6）定子线圈的嵌装应符合下列要求：

① 上下层线圈接头相互错位超过5mm处应进行整形处理，不应影响接头的可靠施焊。前后距离偏差应在连接套长度范围内。

② 线圈直线部分嵌入线槽后，单侧间隙超过0.3mm、连续长度大于100mm时，可用半导体垫条塞实，采用半导体槽衬结构的定子线圈，单侧间隙应符合制造厂的规定。

③ 上、下层线圈嵌装后，按规定进行耐电压试验。

④ 线圈嵌装后应在额定相电压下测定表面，其槽电位一般小于10V。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

10.3 转子装配

转子的现场安装主要包括转子支架的焊接、磁轭装压、热打键（或热加垫）、挂装磁极及绝缘介电强度试验等。

10.3.1 转子支架的组装及焊接

在支架中心体外缘对称挂装扇形瓣，焊接过程中应监视支架尺寸的变化，并采取纠偏措施。焊接完成后进行外观和无损探伤检查。支架的尺寸应符合以下要求：

1）影响转子圆度的立筋板外平面的半径与设计值的偏差应不超过空气间隙的±1.5%。对配制立筋垫板或副立筋板的转子支架，其立筋板的半径应在立筋垫板或副立筋板已焊完并经修磨处理后的尺寸符合此要求。当立筋垫板在焊接后再刨、铣加工，其加工后的半径与设计值的偏差应不超过空气间隙的±1%。

2）筋板的垂直度不大于0.2mm/m。

3）轮臂外缘上下端的弦长应符合设计要求。

4）立筋板的挂钩高程偏差不大于2mm，但相邻两挂钩高程差不大于1mm。

5）制动环板连接面的平面度不超过2.5mm。

10.3.2 磁轭装压

1）磁轭装压是转子组装中的关键工序。为保证磁轭的装压质量，应严格执行冲片叠装的工艺要求。

① 磁轭冲片应先试叠100mm高度，并检查各部尺寸符合要求后，再正式叠装。

② 冲片一般由磁轭键和销钉定位。

③ 磁轭压紧用力矩扳手对称、有序进行，宜在圆周方向均匀抽查不少于10根螺杆的伸长值，以校核预紧力。永久螺杆的应力和伸长值应符合制造厂规定。

④ 磁轭压紧后，按重量法计算磁轭的叠压系数 K 值应不小于0.99。分段压紧高度一般不大于800mm。

⑤ 叠装过程中，应经常检查和调整其圆度。

⑥ 磁轭全部压紧后，磁轭的平均高度不得低于磁轭设计高度。同一纵截面上的高度偏差应不大于5mm。沿圆周方向的高度相对于设计高度的偏差不超过表2.4-64的规定。

表2.4-64 磁轭圆周方向各测点高度允许偏差

单位：mm

磁轭高度 h	$h<1000$	$1000\leqslant h<1500$	$1500\leqslant h<2000$	$2000\leqslant h<2500$	$h\geqslant 2500$
允许偏差	−1～+5	−1～+7	−1～+8	0～+10	0～+11

⑦ 磁轭与轮臂挂钩一般无间隙，个别的应不大于0.5mm。

⑧ 磁轭与磁极的接触面，用不短于1m的平尺检查应平直，个别高点应磨平。

2）径向磁轭键安装应满足下列要求：

① 在冷状态下对称地打紧磁轭键，冷打键时转子支臂与磁轭间在半径方向产生的相对位移一般可根据转子磁轭的残余变形的大小，控制其在半径方向的相对位移的平均值为0.08～0.25mm。

② 磁轭热打键（或热加垫）的紧量必须符合设计要求。

③ 对无轴结构的转子，热打键后应检查转子中心体上、下止口处的变形情况。

④ 对具有磁轭横向键、周向定位键、副定位键和叠片键等多种组合键的安装按制造厂，应规范进行。

3）测量磁轭圆度，各半径与设计半径之差不应大于设计空气间隙值的±3.5%。

4）磁极挂装应满足下列要求：

① 磁极中心挂装高程偏差应符合表2.4-65的要求。

表2.4-65 磁极中心挂装高程偏差

磁极铁心长度（m）	高程允许偏差（mm）
≤1.5	±1.0
1.5～2.0	±1.5
>2.0	±2.0

② 额定转速在300r/min及以上的转子，对称方向磁极挂装高程差不大于1.5mm。

③ 磁极挡块应紧靠磁极鸽尾（T尾）底部，并焊接牢固。

5）磁极挂装后检查转子圆度，各半径与设计半径之差应不大于设计空气间隙值的±4%。

10.4 上、下机架装配

10.4.1 组合式机架装配

1）机架组合主要是机架中心体与支臂的螺栓把紧组合，应保证组合面的紧度。螺栓受力应均匀，并有足够的预应力。

2）组合面螺栓通常采用冷把紧的方法。大容量发电机可采用热把合螺栓或油压拉伸螺杆的方法。采用热把合螺栓，应考虑组合面的间隙、螺栓加热温度、施工速度、螺栓加工精度及测量误差等因素的影响。

3）机架组合后局部间隙应不大于0.05mm，螺栓及销钉附近应无间隙。对承重机架组合面，下端局部不接触长度不得超过长度的10%，全部组合面接触面积应不小于70%。

10.4.2 焊接式机架装配

中心体置于安装间支墩上，调水平。中心体、支臂组合面清洗、检查。用合缝板将各支臂与中心体把合。调整支臂高程，调整支臂基础板下表面到下导轴承座圈中心尺寸，调整下机架各支臂外径弦距。按工艺规范进行焊接。

10.5 发电机总装

定子、转子及机架等已装配和预装配完毕，且水轮机大件已吊入机坑，可进行水轮发电机的总装。总装时应严格遵守安装调整工艺的要求，并依据图样规定的尺寸以及各部件的实测尺寸，确定调整值。

10.5.1 定子安装

1）定子高程应依据水轮机座环顶面高程为基准进行调整。当水轮机吊入、找正，并确定高程后，则应按水轮机主轴法兰及各部件实测尺寸校核高程。水平调整与高程调整应同时进行，其测点位置取机座顶环垫板。高程误差应不大于±1mm，顶环水平误差不大于0.1mm/m。

2）定子中心偏差及圆度调整，应以座环为基准，定出中心。中心线至定子铁心内径的距离，其最大与最小值同所测各点平均值之差，不得超过空气间隙的±4%。

3）当转子先吊入机坑并按水轮机中心找正，检查定、转子间的空气间隙，各间隙与平均间隙之差不大于平均间隙的8%。

10.5.2 转子安装

1）定子找正后便可吊入转子。当转子落在制动器上时；应适当调整中心，以免套装推力头时；与挡油管相碰。在制动器上要放置垫片，使套装后的推力头与镜板之间有10～15mm间隙，以便把合镜板。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2）以定子为基础通过支柱螺钉调整转子高程。

3）借助导轴承推动转子控制定、转子空气间隙实现中心调整。

4）若以水轮机主轴中心为基准找正，可在转子吊入后不拆除吊具而测量主轴法兰的轴向间隙，并通过调整制动器上的垫片调整高程。

5）应以水轮机法兰水平为准，调整制动器上的垫片高度实现水平调整。两法兰相对水平差应不大于0.03mm/m。高程和水平调整可同时进行。

6）测出两法兰的径向偏差，将转子略为吊起，并配合千斤顶移动发电机法兰进行中心调整。

7）按转子找正定子，可按上述方法调整转子，并要求两法兰中心偏差小于0.05mm，法兰之间的不平行度小于0.03mm。根据转子吊装前实测的转子水平中心线的高程（即到法兰的垂直距离），校核定、转子的相应高程。

10.5.3 机架安装

1）通常以座环为基准、进行机架高程和中心测量。

2）高程测点一般在推力轴承座垫板处或导轴承支柱螺钉中心处。上机架高程一般在与机座接合面处，通过配刨基础垫板调整。对具有基础垫板的下机架，通过楔子板进行调整。对承重机架，还应考虑挠度的影响。

3）悬挂的测量钢丝中心线的基准误差一般应控制在0.1mm以内。调整时用千斤顶移动机架。机架中心测定也可以主轴为基准。

4）调整后的机架高程偏差应不大于1mm；中心偏差应不大于1mm；水平偏差应不大于0.1mm/m。

10.5.4 推力轴承安装

推力轴承是水轮发电机最关键的机械部件。推力轴承座与承重机架预装时，应检查推力轴承的中心及推力轴承座与机架垫板的接触情况。

（1）刚性支撑推力轴承安装

1）推力轴承座与垫板的绝缘。轴承座与垫板把紧后测量绝缘电阻值应不低于1MΩ。

2）轴承部件安装。确定镜板高程应考虑机组承载的挠度。镜板水平控制在0.02mm/m以内。

3）热套推力头。推力头与主轴一般采用过渡配合，需要加热套装，采用电加热器加热推力头。对悬式水轮发电机，紧量为0.02～0.05mm。热套间隙应为0.8～1.0mm。套装时推力头水平控制在0.2mm/m以内。推力头卡环应进行预装。推力头热套后温度降至室温时装入卡环，接触应良好无间隙。

（2）液压式弹性油箱推力轴承安装

1）除弹性油箱，其他部件的安装和要求基本同刚性支撑式推力轴承。

2）应仔细清扫弹性油箱波纹部分。对双层推力瓦结构，应研配瓦背与托瓦的接触面，其接触点应均匀分布。

3）确定镜板的高程应考虑机架挠度值及油箱承载后压缩变形量。

10.5.5 推力轴承调整受力

当机组轴线调整合格后，便可进行推力轴承的受力调整工作。

（1）刚性支撑推力轴承受力调整

1）捶击法。中、小容量水轮发电机，多采用捶击法调整受力，测量及调整简单，调整时，机组应位于中心、镜板处于水平状态。根据机组大小选取26.7～53.4N的大锤。各支柱螺钉锁定板与支柱螺钉坐标记线移动的距离相差应不大于1mm，且镜板仍保持水平状态，便可认为受力调整合格。

2）应变仪法。

① 刚性或弹性支撑的大容量水轮发电机推力轴承较常用的一种方法。测量前，将应变片贴在托盘易变形处靠近支柱螺钉的中心部位。应预先用压力机和应变仪对每个贴有应变片的托盘进行载荷与应变值关系的测定。

② 应使各支柱螺钉紧靠轴瓦，并调好镜板水平。当托盘受力最大值和最小值与平均值之差，不超过平均值的10%时认为合格。

3）千分表法。目前广泛应用。要求各变形值与平均值之差，应不大于平均变形值的±5%。

（2）弹性油箱支撑推力轴承受力调整

1）通常用千分表测量各弹性油箱的伸缩值。受力调整应在主轴垂直并位于中心和镜板处于水平的情况下进行，上、下导轴瓦间隙应调到最小值。每个油箱放置一块千分表，表头顶在装于保护罩上的测量杆上。

2）保护罩底面与油箱底盘的间隙应不小于3mm。通过顶起、落下转子，调整支柱螺钉（升高或降低）。为了避免油箱倾斜所引起的测量误差，测量杆沿着推力轴承的半径方向布置，并且每个油箱装置两块千分表，同顶在一个测量杆上（应折算到承载后油箱中心的变形值），经反复测量和调整直至合格。

3）要求各弹性油箱压缩量的偏差不大于0.2mm，且镜板水平符合要求。

10.5.6 机组中心调整

1）指转动部分中心调整。机组轴线合格以及受力调整后，可进行机组中心调整。应使定、转子空气间隙和水轮机转轮与迷宫环的间隙在规定的范围内，并使转动部分的旋转中心线，尽可能处于机组固定部分的中心位置。

2）应以水轮机固定迷宫环中心为基准，以迷宫环间隙找正机组中心。根据各部分测得的间隙值，确定调整的方向和大小。调整时，推力瓦面上应涂以润滑油用千分表监视移动量。对悬式机组，在镜板处设千斤顶调整；对伞式机组，借助于下导轴瓦调整。中心确定后将导轴瓦抱紧固定，并在水轮机迷宫环间隙处，对称4个方向用楔子板打紧以防中心移动。

3）检查定、转子间上、下端空气隙的均匀度，以及各导轴承座圈与大轴的间距。

10.5.7 导轴承瓦间隙确定

1）机组中心确定后，应根据盘车测定的合格摆度值确定轴瓦单侧间隙的分配值。摆度方向大的间隙应调小些，但不宜小于0.03mm。

2）对悬式机组，水轮机导轴承瓦间隙已按盘车摆度值调整到正确位置，并且上导轴颈已处在中心位置，上导轴承瓦单侧间隙可取设计间隙平均值，下导轴承瓦单侧间隙应考虑轴线的实际位置和摆度方位分配确定。

3）导瓦间隙是通过导瓦背面与支柱螺钉（球面支柱等）间的间隙而测得的，其偏差不超过±0.02mm。

4）对采用弹性油箱支撑的推力轴承，由于它具有良好的自调性能，因此，各部导轴承瓦间隙可按设计值均匀调整，不考虑摆度值。如果主轴不在中心位置，可从平均值中减去偏心值。

11 试验

按GB/T 7894—2001《水轮发电机基本技术条件》规定，水轮发电机应进行厂内检查试验，完成装配后进行现场

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

交接试验、起动试运行试验、72h连续运行、考核试验、性能试验、型式试验。所有试验项目能在制造厂内进行的，均应在制造厂内完成。对于定子铁心、转子磁轭在现场叠装或不能在制造厂内进行总装配和试验的水轮发电机，应以国家标准和制造厂的技术文件或有关规程为依据，在工地现场安装完毕后，且在制造厂技术人员指导和监督下进行试验。

11.1 试验标准

主要试验标准有：

GB 755《旋转电机 定额和性能》

GB/T 1029《三相同步电机试验方法》

GB/T 2521《冷轧晶粒取向、无取向磁性钢带（片）》

GB/T 5321《量热法测定电机的损耗及效率》

GB/T 6075.5《在非旋转部件上测量和评价机器的机械振动 第五部分：水力发电厂和泵站机组》

GB/T 7409.3《同步电机励磁系统大、中型同步发电机励磁系统技术要求》

GB/T 7894《水轮发电机基本技术条件》

GB/T 8564《水轮发电机组安装技术规范》

GB/T 10069.1《旋转电机噪声测定方法及限值噪声工程测定方法》

GB/T 11348.5《旋转机械转轴径向振动的测量和评定 第五部分：水力发电厂和泵站机组》

GB 50150《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》

JB/T 1270《水轮机、水轮发电机大轴锻件技术条件》

JB/T 6204《大型高压交流电机定子绝缘耐压试验规范》

JB/T 7023《水轮发电机镜板锻件技术条件》

JB/T 7608《高压交流电机线圈绝缘介质损耗角正切试验方法及限值》

JB/T 8445《三相同步发电机负序电流承受能力试验方法》

JB/T 10098《交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平》

JB/T 56041.1《电机用埋置式热电阻一般规定、检验方法和检验规则》

DL/T 507《水轮发电机组起动试验规程》

DL/T 730《进口水轮发电机（发电/电动机）设备技术规范》

11.2 试验项目

11.2.1 厂内主要检查试验项目

1）硅钢片的磁化特性及损耗试验。

2）关键部位材料的化学成分和力学性能试验。关键部位材料包括转轴、转子支架、冲片、推力头、镜板、推力轴承弹性支撑件、直接液内冷水轮发电机空心导线等。

3）转子单个线圈电阻和绝缘电阻测定及定子、转子单个线圈耐电压试验。

4）定子多匝叠绕线圈匝间耐电压试验。

5）定子单个线圈冷热状态的介质损耗试验，介质损耗角正切及其常态增量测定，起晕电压测定。

6）定子线棒绝缘的工频击穿电压试验。按随机抽样做试验，试验电压应以1kV/s的速度逐步升高，直至定子线棒绝缘击穿为止。如果通过则认为全部合格，如果有击穿再随机加倍抽样做试验。

7）转子绕组匝间绝缘耐电压试验。

8）水轮发电机轴和水轮机轴的预组装并检查轴线偏差，水轮发电机轴或推力头与转子中心体的预组装并检查轴线偏差。

9）对工件尺寸、装配尺寸进行校验，对部件进行预组装。部件包括定子分瓣机座、圆盘式转子支架、导轴承和推力轴承装配及盖板、挡风板装配等。

10）所有承受水压、油压、气压的部件和管路及其连接件，应进行压力试验。

11）直接液内冷定子线棒的水压、流量试验。

12）如有必要，新型或大型水轮发电机推力轴承的负荷试验及通风系统运行状态的模型试验。

对在制造厂内完成定子、转子分装配的水轮发电机，厂内检查试验项目还应包括11.2.2中的项1）～项10）的试验项目。

11.2.2 现场主要交接试验项目

1）定子铁心磁化试验。

① 定子铁心磁化试验是利用专门缠绕在定子铁心的励磁线圈，通以工频交流电流，使之在定子铁心内部产生交变磁通（接近饱和状态），使铁心中绝缘劣化的部分产生较大的涡流，则该处温度很快升高，然后用温度计或采用红外热像仪测出各部温升，以判别发电机定子铁心质量是否合格。

② 试验前，应测量定子铁心初始温度和环境温度。试验时，在励磁线圈中施加工频交流电源，调整励磁线圈端电压，使定子铁心磁通密度接近1.0T。试验持续时间为90min。

③ 在规定的磁通密度，经过规定试验时间后，铁心质量判定标准：

铁心最大温升 Δt_{max} 限值为：Δt_{max} 25K；

相同部位（定子齿或槽）温差 δ_t 限值为：δ_t 15K。

2）直接液冷定子绕组的水压、流量和检漏试验。

3）绕组对机壳及绕组相互间绝缘电阻的测定。

① 定子绕组吸收比 R_{60}/R_{15} 应不小于1.3。

② 定子绕组极化指数 R_{10}/R_1 应不小于2.0（在温度为40℃以下测量时）。

③ 转子绕组绝缘电阻值应不低于0.5MΩ（在温度为10～30℃测量时）。

4）检温元件的绝缘电阻测定。

埋置检温元件的绝缘电阻值应不低于1MΩ（在温度为10～30℃测量时）。

5）绕组在实际冷状态下直流电阻的测定。

① 可用电桥法、微欧计法、电压表电流表法或者其他方法测量。

② 定子绕组在实际冷状态下，直流电阻最大与最小两相间的差值，在校正了引线长度不同引起的误差后应不超过最小值的2%。

6）定子绕组直流耐电压及泄漏电流的测定。

7）绕组工频交流耐电压试验。

8）定子绕组整体起晕电压试验。

发电机整机定子绕组整体起晕电压应不低于1.1倍额定线电压，以端部无明显晕带和连续的金黄色亮点为准。

9）定子绕组对地电容电流测定。

10）转子每个磁极交流阻抗测定。试验电流应控制在80%I_{fN}以下，或试验所加电压应不超过额定励磁电压。

11）轴承绝缘电阻测定。轴承绝缘电阻测定用不高于1000V的绝缘电阻表测量。推力轴承和导轴承的绝缘电阻值应不低于1 MΩ（在温度为10～30℃测量时）。

12）油气水系统试验（压力和功能试验）。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

11.2.3 起动试运行主要试验项目

1）轴承温度测定。水轮发电机在额定运行工况下，其轴承的最高温度采用埋置检温计测量，应不超过下列数值：

推力轴承巴氏合金瓦	80℃
推力轴承塑料瓦体	55℃
导轴承巴氏合金瓦	75℃
座式滑动轴承巴氏合金瓦	80℃

2）振动测定。

3）动平衡试验。

4）过速试验。

5）相序测定。

6）轴电压测定。

7）短时过电流和升高电压试验。短时过电流试验时，发电机应处于接近工作温度的热状态下进行。在短时过电流试验中，发电机应不发生冒烟、臭味和有害变形等异常情况。对于液内冷及高电负荷值的发电机，要注意端部结构件过热。

8）空载特性试验。空载定子电压应达到额定值的1.3倍或额定励磁电流所对应的电压值。

9）三相稳态短路特性试验。定子电流应达到1.2倍额定电流。

10）额定励磁电流和电压变化率的测定。额定励磁电流可采用直接负载法测定或绘图法确定。电压变化率可采用直接负载法测定或额定励磁电流法测定。

11）电压波形正弦性畸变率测定。水轮发电机在空载额定电压和额定转速时，线电压波形正弦性畸变率应为下列数值：

额定容量大于300kVA者不超过5%。

额定容量为300kVA及以下者不超过10%。

12）电话谐波因数测定。水轮发电机在空载额定电压和额定转速时，线电压电话谐波因数（THF）应为下列数值：

额定容量为300kVA～1MVA者不超过5%。

额定容量大于1～5MVA者不超过3%。

额定容量大于5MVA者不超过1.5%。

13）甩负荷试验。甩100%负荷时，发电机定子电压超调量应不大于15%～20%额定电压值，调节时间不大于5s，电压摆动次数不超过3～5次。

14）噪声测定。在水轮发电机盖板外缘上方垂直距离1m处测量的噪声水平，应为下列数值：

额定转速为250r/min及以下者不超过80dB(A)。

额定转速高于250r/min者不超过85dB(A)。

11.2.4 性能试验项目

(1) 绕组电抗和时间常数测定

1）直轴同步电抗 X_d 可用空载饱和特性与三相稳态短路特性确定或用低转差率试验确定。

2）短路比SCR可用空载饱和特性与三相稳态短路特性确定。

3）交轴同步电抗 X_q 可用反励磁试验确定或用低转差率试验确定。

4）直轴瞬态电抗 X'_d 可用三相突然短路试验确定或电压恢复试验确定。

5）直轴超瞬态电抗 X''_d 可用转子处于任意位置时的外施电压试验确定，用转子特定位置时的外施电压试验确定，三相突然短路试验确定或电压恢复试验确定。

6）交轴超瞬态电抗 X''_q 可用转子处于任意位置时的外施电压试验确定，或用转子特定位置时的外施电压试验确定。

7）零序电抗 X_0 可用三相绕组外施单相电压试验确定，或两相对中性点稳态短路试验确定。

8）负序电抗 X_2 可用两相稳态短路试验确定，或逆同步旋转试验确定。

9）直轴瞬态开路时间常数 T'_{d0} 可用电压恢复试验确定，或定子绕组开路时的励磁电流衰减试验确定。

10）直轴瞬态短路时间常数 T'_d 可用三相突然短路试验确定，或定子绕组短路时的励磁电流衰减试验确定。

11）直轴超瞬态短路时间常数 T''_d 可用三相突然短路试验确定。

12）定子绕组短路时的非周期分量时间常数 T_a 可用三相突然短路试验确定。

(2) 效率及损耗试验

效率及损耗可采用量热法，或自减速法进行测定。推力轴承损耗，只计入由水轮发电机转动部分引起的那部分损耗。

(3) 温升试验

1）电机绕组或其他部分的温度测量方法有以下三种：电阻法、温度计法和埋置检温计法。不同的方法应不作为相互校核用。

2）根据试验设备条件可采用直接负载法、低功率因数负载法或空载短路法进行温升试验。

(4) 过励调相及欠励进相运行试验

可按用户要求进行。

1）进相运行试验有关限值规定：

① 根据发电机运行规程，水轮发电机的最低运行电压，应根据稳定运行和厂用电电压的要求确定，一般不应低于额定值的90%。发电机端电压变化范围不得超过$\pm 5\% U_N$。

② 定子电流变化范围不得超过$\pm 5\% I_N$。

③ 定子边段铁心温度不得超过120℃，压指温度不得超过130℃，压圈温度不得超过200℃。

④进相运行时，电网电压不得低于调度中心给定的运行电压下限值。

⑤机组振动不得超过250μm。

2）进相运行测量。

① 测量定子三相电流、定子三相电压、有功功率、无功功率、功率因数、功角；测量转子电压、转子电流；测量电网侧三相电压、厂用电三相电压。

② 一般应在发电机端部埋设检温元件，在端部的压圈、压指、阶梯铁心、螺杆等处埋设热电偶（铜-康铜热电偶）测点约为20个。

3）进相运行试验。

① 进相运行试验时，试验机组应按试验要求进行调整，厂内其他发电机均处于迟相正常运行状态，保持正常有功和无功不变，自动励磁调节器投入运行。

② 水轮发电机在某一有功负荷下运行。保持有功负荷不变，逐步增加无功，观察机组运行情况，找到最大进相点。每一步读取机组三相定子电流、机端三相定子电压、励磁电流、励磁电压、有功、无功、功角、线路电压、线路有功和无功，并监测电机各部温度和机组振动。进行完第一个试验工况后，缓慢增加励磁电流，增加有功出力，使其达到第二工况的有功值，重复上述试验步骤，直到完成所有工况。

③ 在第一工况和最后工况做温升试验，机组温升稳定约需5h。

4）滞相无功试验。水轮发电机组并网，增加有功，保

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

持有功功率为一定值条件下，逐步增加无功，每步记录机组三相定子电流、机端三相定子电压、励磁电流、励磁电压、有功、无功、功角、线路电压、线路有功和无功。在无功增加达到试验允许最大值后，一个有功水平下的滞相无功试验即告完成。然后增加有功至一个新工况，在此有功功率下，逐步增加无功至最大无功允许值为止。滞相无功试验仅在额定有功功率下测量发电机温升。

(5) 转动惯量试验

可采用自减速试验法测定。

(6) 三相突然短路试验

1) 可按用户要求进行。本试验系破坏性试验，试验前必须仔细检查电机装配及安装质量，如定子绕组端部绑扎是否牢固；转子螺母是否旋紧牢靠；电机基础是否处于良好状态；底脚螺栓及螺母是否旋紧等。试验前，应测定绕组对机壳及相互间的绝缘电阻。

2) 在进行突然短路时，不允许有人留在被试电机、短路开关及引线（尽可能短）附近，以保证人身安全。试验时电机应接近工作温度，如无其他规定，试验应在电机空载而励磁他励相应于1.05倍额定电压下进行，短路共历时3s。

3) 消除短路后，应不产生有害变形且能承受耐电压试验。

(7) 飞逸转速试验

可按用户要求进行。由用户选择一台机组在设备保证期内的适当时机进行水轮发电机性能试验。

12 附属设备

12.1 油水管路

12.1.1 管路

1) 分冷却器进出水管路和各轴承油槽的进出油管路，如图2.4-191所示。对承受压力的管路，一般无特殊规定时，管路内部流体的工作压力不大于2.5MPa，其试验压力为1.5倍工作压力，时间60min；流体的工作压力大于2.5MPa时，其试验压力为1.25倍工作压力，时间60min。水管路的冷却水压一般为0.2～0.6MPa，试验压力为1.5倍工作压力。油管输送的润滑油通常不考虑压力，采用普通无缝钢管。也有些电站要求水管路或油管路采用不锈钢管。

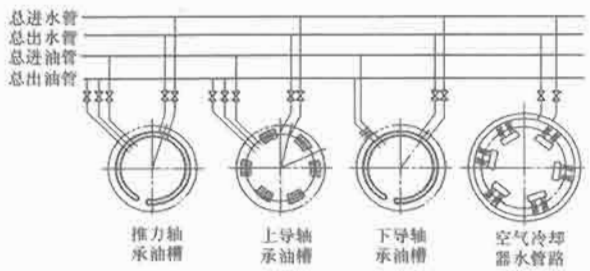


图2.4-191 典型油水管路系统示意

2) 对普通无缝钢管，其材料可选10钢或20钢。通常钢管应逐根进行水压试验，保证耐压时间不少于5s，此时钢管不得出现漏水和渗水现象。

3) 对不锈钢管，其材质常选1Cr18Ni9Ti。通常钢管应逐根进行水压试验，保证耐压时间不少于5s，此时钢管不得出现漏水和渗水现象。

4) 对管路上的连接法兰，选用公称压力为1.0MPa就能满足要求。应根据管路的材质选择法兰的材料，应注意法兰与钢管的焊材选择：普通钢材料间的焊接焊材选择H08Mn2SiA，不锈钢材料间的焊接焊材选择H00Cr18Ni14Mo2。

5) 一般埋设的水管间采用焊接方式，明敷水管之间一般采用法兰连接或螺纹连接。油管之间的连接不宜采用螺纹连接。所有管路焊接、连接完成后，应整体做水压试验。试验压力为1.5倍工作压力，时间为60min。

12.1.2 阀门

1) 油水管路一般属低压范围，因此可配置低压阀门。其材质与管路的材质相当。考虑安全稳定及对冷却水流量的可调节性，对管路外径不大于120mm，采用截止阀或球阀；大于120mm的采用碟阀。

2) 阀门应设锁定装置，以防振动或误操作导致阀误动。

12.2 照明

为方便检修和日常维护，应在定子机座周围的通道、轴承及支架区域、集电环和电刷周围及轴承油槽等地方设置一定数量的照明灯和应急灯。照明灯通常选择白炽灯或荧光灯照明器。考虑到电站的实际情况，照明灯宜采用防潮防爆灯座。

12.3 电缆

常用的电缆有照明电缆、动力电缆和控制电缆。照明电缆一般为三芯、阻燃型，应符合NEMA标准或GB 5023《额定电压450/750V及以下聚氯乙烯绝缘电缆》。电缆的最高连续工作温度为90℃（干）。动力电缆常采用四芯阻燃型，为0.6/1kV级电缆，符合NEMA标准或GB 12706《额定电压35kV及以下铜芯、铝芯塑料绝缘电力电缆》中的规定。电缆的最高连续工作温度为90℃（干）。控制电缆为450/750V级电缆、屏蔽型，符合NEMA标准或GB9330《塑料绝缘控制电缆、聚氯乙烯绝缘和护套控制电缆》。

12.4 测温电阻

1) 一般采用装配式铂热电阻，用以测量绕组温度、轴承瓦温、油槽油温、冷却水温度及空气温度。由感温元件、不锈钢外保护管、接线盒以及适应不同用途的固定装置组成。

2) 热电阻应符合JB/T 8622—1997《工业热电阻技术条件及分度表（与IEC-751DIN-43760等效）》和JB/T 56041.1—1993《电机用埋置式热电阻一般规定检验方法和检验规则》的要求。

3) 常用的铂热电阻有单元件和双元件两种。单元件铂热电阻指在一只温度计内仅布置一套测温元件，其引出的测温线一般为2根或3根（包括接地线）。双元件铂热电阻指在一只温度计内布置两套测温元件，可同时输出两组相同的电阻信号供使用。其引出的测温线可为4根、5根或6根。双元件铂热电阻主要用于需用两套显示、记录或调节仪同时检测同一地点温度的场合。

12.5 端子箱

发电机应用的端子箱有动力端子箱和测温端子箱。

1) 动力端子箱一般布置在机坑外壁上，为机组各类用电器提供动力电源和照明电源。它应具有防潮、防尘等措施。对内部端子较多或配电量较大的端子箱，内部还应装设照明灯、风扇及由恒温器控制的电加热器等设备，保证端子箱内的设备安全稳定运行，并方便检修。

2) 测温端子箱可布置在机坑内或机坑外。发电机各类

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

测温元件的输出信号电缆均连接到测温端子箱内相应的端子上。端子箱应有足够的深度空间，以便布置足够数量的电缆。端子箱箱体一般采用1.5～2.5mm的钢板制造，以保证端子箱有足够的刚、强度。端子箱内部一般也设置照明灯、风扇及由恒温器控制的电加热器等设备。

典型水轮发电机电缆及测温元件的布置如图2.4-192所示。

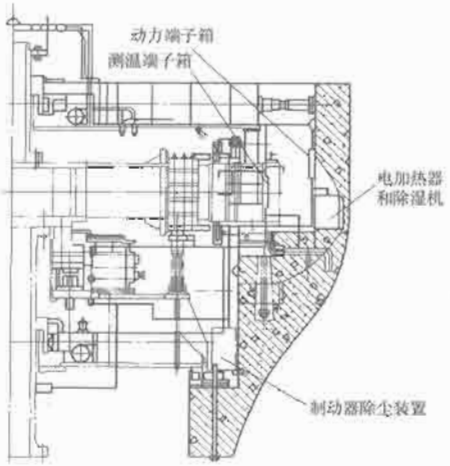


图2.4-192 典型水轮发电机电缆及测温元件布置示意

12.6 电加热器

1）为防止长时间停机时由于环境湿度较大造成机组电器设备受潮或结露及环境温度过低造成机组起动困难，一般水轮发电机机坑内部设置一定数量的壁挂式或座式电加热器。常用的电加热器功率为1.5～2kW。电加热器总功率可根据机坑容积和电站所在地区的平均环境温度估算选择。平均环境温度较低地区的电站，可按每千瓦对应15～16m³机坑容积估算；对平均环境温度较高地区的电站，则可按每千瓦对应22～25m³机坑容积估算。

2）电加热器的技术要求可参见JB/T 7836.1—2005《电机用电加热器 第1部分：通用技术条件》。

12.7 除湿机

地处环境湿度较大的电站，通常需配备一定数量的除湿机。除湿机一般是自动控制，可根据环境湿度自动投入，当湿度降低到设定值以下自动切除。

12.8 粉尘收集装置

1）凡设有机械制动装置的水轮发电机，应设置制动器粉尘收集装置，以除去制动粉尘。

2）一般由吸尘罩、管路、吸尘器及控制装置构成。吸尘罩包围在制动器四周，其作用是捕集粉尘。吸尘罩通过管路与吸尘器连接，吸尘器基本原理同家用吸尘器。通过控制装置，吸尘器接受电站中控室发出的指令实现投入或退出运行。

3）传统的大罩式制动器除尘装置结构如图2.4-193所示。吸尘罩为整体密闭结构，将整个制动器全部封罩，只在靠近制动环的部分有间隙。

4）目前广泛采用的新型小罩式制动器粉尘收集装置如图2.4-194所示。

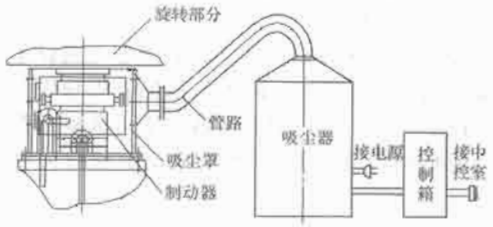


图2.4-193 大罩式粉尘收集装置

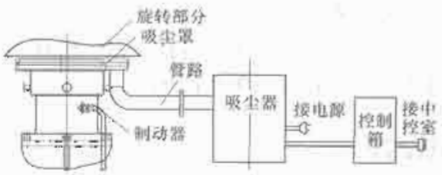


图2.4-194 小罩式粉尘收集装置

其特点为小型吸尘罩固定在制动板的外缘上，构成一个“U”形结构，随着旋转部件而来的空气正好从“U”开口进入吸尘罩，在吸尘器的负压作用下，制动粉尘被吸走。该结构具有体积小、造价低、吸尘效果好、安装简单、维护方便等优点。

12.9 炭粉吸收装置

为除去电刷与集电环摩擦产生的粉尘，可设置炭粉吸收装置。其基本结构与制动器粉尘收集装置的相同。卧式机组一般都设有集电环罩，可作为吸尘罩，而不必设专用吸尘罩。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第5章 柴油发电机

1 概述

柴油发电机（以下简称发电机）由柴油机驱动，两者组成柴油发电机组，通常用作工矿企业、医院、楼房的应急备用电源；军事与民用通信，战地和野外作业，车辆、船舶等特殊用途的独立电源；大电网不能输送的地区或不适于建立火力发电厂的地区的生活和生产所需的电源，以及各种移动电站等。

它的功率可以从几千瓦直至30MW。当频率为50Hz时，中小型发电机的额定电压一般为400V，大中型发电机的额定电压为6.3～10.5kV。

发电机绝大部分都采用转场式结构，只有小功率特殊用途时才考虑转枢式结构。旋转磁场结构又分为凸极和隐极两大类。凸极结构绝大部分均采用磁极与磁轭相连的整体凸极，励磁绕组直接绕到磁极上，端部很短，节约用铜并改善了散热条件。而隐极结构，在相同状况下，所耗励磁功率比凸极结构要大，再加上励磁绕组嵌在槽内，端部较长，在相同功率情况下，消耗材料以及效率指标都不如整体凸极结构。极数较多时，如6极以上发电机，凸极结构机械绕线有困难，而隐极结构嵌线则较容易，可靠性也高，因此，长期以来均是凸极、隐极并存发展的局面。

1.1 发电机与柴油机的功率匹配

一般情况下，与发电机配套的柴油机选用额定功率为12h功率和持续功率两种。当选用12h功率表示额定功率时，说明柴油机在额定功率下（标准环境状况时）连续运行时间为12h，其中包括超过10%额定功率情况下连续运行1h；当选用持续功率为额定功率时，表示柴油机允许长期连续运作，其中包括可超过10%额定功率下运行1h。通常情况下，持续功率为12h功率的90%。

柴油机铭牌上标定的额定功率是按规定的标准环境状况下确定的，见GB1105.1《内燃机台架性能试验方法，标准环境状况及功率、燃油消耗和机油消耗的标定》，柴油机额定运行的标准环境条件是：大气压 $p=100\text{kPa}$；相对湿度为30%；环境温度 $T=298\text{K}$ 或25℃。

当使用时的环境条件与标准规定的不同时，其功率应按GB1105.1进行修正。

柴油机的额定功率用千瓦（kW）表示。在配套时，柴油机应有足够的功率，以保证发电机在额定转速下输出额定功率。

当发电机为额定功率时，实际所需的柴油机最小输出功率可按下式计算

$$P=\frac{1}{\alpha K_1}\left(\frac{P_N}{\eta}+N_P\right)\quad(\text{kW})\text{或}(\text{电工马力})\qquad(2.5\text{-}1)$$

式中，P_N 为发电机额定功率，kW；N_P 为柴油机风扇损耗，kW；η 为发电机效率；K_1 为功率变换系数，当柴油机用kW表示额定功率时 $K_1=1$，用电工马力表示时 $K_1=0.746$；α 为柴油机功率修正系数。

由式（2.5-1）计算所得的柴油机功率应圆整到标准规定的值或工厂样本提供的功率等级。按经验，柴油机额定功率（电工马力）与发电机功率（kW）之比，对于平原固定电站取为1.6∶1，对于移动电站取为2∶1。

1.2 励磁系统特点

发电机的励磁系统，一般应满足下列基本要求：

1）在95%～105%额定电压范围内，保证发电机端电压能随意整定。

2）发电机负载变化后，仍能使发电机端电压维持规定精度，即保证达到规定的稳态电压调整率。

3）有足够的强励能力，并能保证当发电机负载突变时，发电机端电压瞬时升、降符合要求，并在规定时间使发电机电压恢复正常。

4）不引起发电机电压波形的畸变。

5）损耗小，效率高。

6）有并联运行要求时，应保证发电机稳定运行，并维持各发电机间适当的有功功率和无功功率的分配。

发电机的励磁系统有静止励磁系统与无刷励磁系统两大类（参见本篇第8章）。自励式静止励磁系统又包括可控或不可控相复励励磁系统、可控与不可控双绕组电抗分流励磁系统、三次谐波励磁系统和电压源静止励磁机的励磁系统。无刷励磁则采用交流励磁机-旋转整流器励磁系统。除不可控相复励与不可控双绕组电抗分流系统外，均带有自动电压调节器。

1.3 结构防护型式与安装型式

结构防护型式与安装型式参见第1篇第2章。发电机的防护等级有IP11、IP21、IP22、IP23，有特殊要求时也可有IP44、IP54。

发电机采用的安装型式有IMB3、IMB35、IMB34，还有底脚抬高并带有凸缘端盖（B14/B20，B5/B20）的安装型式。

1.4 主要技术性能

发电机的主要性能指标除温度效率外，还有以下几个方面。

1.4.1 稳态电压调整率

发电机的电压整定范围为95%～105%额定电压。当发电机整定在95%或100%额定电压时，发电机从空载到额定负载的功率因数应在1.0～0.8（滞后）之间变化，并且三相电流平衡；柴油机转速变化率按规定值（一般规定为5%，即空载时为105%额定转速，满载时为额定转速）变化时，电压变化值与整定电压之比的百分数称为稳态电压调整率。根据使用要求不同，有±1%、±2.5%（或±3%）、±5%三种指标，也可以提出更高要求。

稳态电压调整率按下式计算

$$\delta_u=\pm\frac{U_{max}-U_{min}}{2U_N}\times 100\%\qquad(2.5\text{-}2)$$

式中，U_N 为整定电压；U_{max}、U_{min} 为从空载到额定负载的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

稳定电压，取负载变化时各点电压中最大值和最小值。

柴油机的转速变化率按下式计算

$$\delta_n = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100\% \qquad (2.5\text{-}3)$$

式中，n_0 为空载转速，r/min；n_N 为额定转速，r/min。

1.4.2 突加、突甩负载时，瞬态电压调整率和恢复时间

当发电机突加负载时，其端电压将瞬时降低；突甩负荷时，端电压会瞬时升高，均需一定时间才能恢复至规定值。这种最大瞬时值与额定电压之差与额定电压之比的百分数称为瞬态电压调整率。

瞬态电压调整率及恢复时间与以下因素有关：

1）负载性质及大小。

2）励磁系统的强励能力。

3）发电机的电抗时间常数。

1.4.3 起动异步电动机的能力

发电机在空载额定电压时，允许直接起动一定功率的空载的异步电动机。T2、TFW 系列小型三相同步发电机允许直接起动空载四极笼型转子基本系列异步电动机（此时动态性能不作考核）的能力见表 2.5-1。

表 2.5-1 T2、TFW 系列三相同步发电机起动异步电动机的能力

发电机额定功率 P_N (kW)	被起动异步电动机功率 (kW)	发电机额定功率 P_N (kW)	被起动异步电动机功率 (kW)
40 及以下	$0.7P_N$	90，120	55
50，64，75	30	150，200	75

在额定电压和额定频率下，直接起动异步电动机时，发电机定子电流非常大，发电机定子绕组端部产生的电磁力和局部过热也很大，因而起动次数不能频繁。

1.4.4 对工业无线电干扰的要求

对发电机有无线电干扰端子电平要求时，其允许值应不大于表 2.5-2 的规定。按 GB 3907《工业无线电干扰基本测量方法》进行测量考核。特殊情况可提出更高要求。

表 2.5-2 工业无线电干扰端子电平允许值

频率 (MHz)		0.15	0.25	0.35	0.6	0.8	1.0	1.5	2.5	3.5	5～30
端子电平允许值	μV	3000	1800	1400	920	830	770	680	550	420	400
	dB	69.5	65.2	62.9	59	58	58	56.7	54.8	54	52

1.4.5 振动和噪声的要求

发电机在空载时测得的振动速度有效值不超过表 2.5-3 的规定。按 GB 10068《轴中心高为 56mm 及以上电机的机械振动、振动测量、定额及限值》考核。

表 2.5-3 振动限值

中心高 (mm)	225 以下	225	280	315	355	400
振动速度 (mm/s)	1.8	2.8	3.5			

发电机的振动指标，反映了制造厂的综合工艺水平，是用户和质检部门经常关注的指标。

发电机在空载时测得的噪声数值（A 计权声功率级）应不超过表 2.5-4 的规定。按 GB 10069-3《旋转电机噪声测定方法及限值》考核。

表 2.5-4 噪声限值

功率 (kW)	30	40	50	64	75	90	100	120	150	160	200
声功率级 (dB)(A)	94	97		100				103			
功率 (kW)	250	300	320	350	400	500	600	700	800	1000	
声功率级 (dB)(A)	106						108				

2 设计要点

2.1 定子绕组

小型柴油发电机一般采用半闭口槽和散嵌绕组，较大容量的也采用半开口槽和成形绕组。

每极每相槽数 q 的选择应考虑下列因素：

1）为改善电压波形，一般 $q \geqslant 3$。

2）发电机定子齿宽要保证齿有足够的机械强度。

3）采用分数槽时，要满足绕组对称要求。

4）采用扇形片时，应易于分片并使 $N_0 t/p$ 等于偶数或其分子为偶数的最简分数（其中 t 为每层叠片的扇形数，p 为极对数）。当相邻两层扇形片错开 1/3 片叠片时，$N_0=3$；当错开 1/2 片叠片时，$N_0=2$。

5）当冲片为两种级数通用时，应考虑两种极数的 q 同样满足有关要求。

4、6、8 极发电机一般选用 $q=$ 整数，当大于 8 极时，也可选用分数槽以求改善电压波形。

绕组形式一般采用 60°相带的双层叠绕组，有时因励磁系统需要，除主绕组外还有辅助绕组。绕组形式应根据需要设计，例如，当采用三次谐波励磁时，常采用单、双层绕组，谐波绕组放在单层绕组的槽内，节距为主绕组的 1/3。当采用双绕组电抗分流式励磁系统时，仍采用双层叠绕组，辅助绕组放置在靠近电枢槽口处，并视需要决定主绕组与辅助绕组之间的电相位关系。

2.2 斜槽

柴油发电机通常气隙较小，齿谐波电动势对电压波形的影响较大，因而常用斜槽方法来消除齿谐波电动势，以改善电压波形。一般是电枢斜一个齿距，相应地设计时感应电动势应乘以斜槽因数。斜槽因数按下式计算

$$K_{sk\nu} = \frac{57.3\sin\left(\nu\frac{\theta_{sk}}{2}\right)}{\nu\frac{\theta_{sk}}{2}} \qquad (2.5\text{-}4)$$

式中，ν 为谐波次数；θ_{sk} 为斜槽电角度。

2.3 凸极与隐极转子

目前生产的工频柴油发电机都采用旋转磁场式结构，凸极转子与隐极转子并存。除老系列外，已趋向在柴油发电机转子上装设高阻尼绕组，并采用全阻尼结构。

2.3.1 凸极转子

为获得接近正弦分布的气隙磁场，凸极发电机的极弧系数 α_0 取为 0.68～0.73，一般极数大者取较小值。最大气隙与最小气隙之比，即 $\delta_m/\delta=1.5$。对于采用三次谐波励磁的发电机，为使气隙磁场中空载和负载时谐波分量适当，则取 $\delta_m/\delta=1.2\sim1.3$；为制造方便，在多数情况下发电机常采用均匀气隙，即 $\delta_m/\delta=1$。

为减少加工工时，趋向采用磁极与磁轭相连的整体结

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

构，磁极绕组直接绕在绝缘后的磁极上，以节约用铜量并改善励磁绕组的散热条件。对极数较多的发电机，这种结构用机械绕线困难。

2.3.2 隐极转子

在大多数情况下都采用等分度槽、相等匝数结构，每极嵌放线圈的槽数为6～8槽，获得近似梯形状分布的磁动势曲线。如果要获得按正弦波分布的磁动势曲线，可采用大、小槽结构，嵌放不同数量的导体，见表2.5-5。

表2.5-5 气隙磁场接近正弦分布时每极励磁绕组各线圈的匝数比例 单位：%

$\frac{Qr}{2p}=8$			$\frac{Qr}{2p}=9$			$\frac{Qr}{2p}=10$			$\frac{Qr}{2p}=11$			$\frac{Qr}{2p}=12$		
线圈节距	正弦分布	近似正弦	线圈节距	正弦分布	近似正弦	线圈节距	正弦分布	近似正弦	线圈节距	正弦分布	近似正弦	线圈节距	正弦分布	近似正弦
1～8	41.5	39	1～9	34.7	33	1～10	32.5	31	1～11	28.4	28	1～12	26.8	26
2～7	35	39	2～8	30.5	33	2～9	29.3	31	2～10	26.2	28	2～11	24.9	26
3～6	23.5	22	3～7	22.7	21	3～8	23.8	23	3～9	21.7	18	3～10	21.4	18
			4～6	12.1	13	4～7	14.9	15	4～8	15.6	18	4～9	16.4	18
									5～7	8.1	8	5～8	10.5	12

隐极发电机转子阻尼绕组应放置在齿的顶部，考虑阻尼槽对磁路的影响，磁路可采用分段计算法。当采用轴向通风孔时，应注意尽可能减少对电机磁路的影响。

2.4 通风与冷却

柴油发电机一般采用开启式（IC01）冷却方式，但由于使用场合要求不同，还可以采用具有空气过滤器或水-空气冷却器的闭路循环冷却系统。

对于冷却方式为IC01的发电机，通常采用轴向通风系统，在发电机的拖动端装有离心式风扇。发电机旋转时，冷却空气自非拖动端的进风口吸入，经由铁心与机座间的空间，定、转子间的气隙，转子铁心轴向通风孔以及磁极极间空间（凸极），通过风扇在拖动端的出风口排出。

风扇的选用参见第1篇第6章7节。风扇的强度设计应充分考虑共振、振动疲劳等因素。

2.5 轴的扭振

柴油发电机组的轴系是一个弹性系统。柴油机气缸内的气体压力、往复惯性力等的周期性作用，会激起系统的强迫振动。当柴油发电机组的轴系固有扭振频率与柴油机轴上输出的周期性转矩频率一致时，将引起共振，它可以造成断轴等严重后果。设计柴油发电机或电站时，应充分考虑整个轴系的这些问题，慎重选取轴径、轴的材料和飞轮力矩GD^2，并应使机组固有扭振频率与柴油机转矩中任一交变分量的频率相差20%以上。

柴油机轴上输出的周期性转矩，其主要交变分量的频率可按下式计算

$$f_m=\frac{2Cn}{60T} \tag{2.5-5}$$

式中，C为气缸数；n为转速，r/min；T为冲程数。

柴油机各气缸产生的转矩大小难免有所差异，所以转矩中尚有频率为$2n/60T$和它的2倍，3倍，…，$(C-1)$倍等交变分量。

3 机组运行

3.1 单机运行

由于输入转矩周期性变化，柴油发电机的转速和输出电压是不均匀的。转速不均匀度可用下式表示

$$d=\frac{\omega_{max}-\omega_{min}}{(\omega_{max}-\omega_{min})/2} \tag{2.5-6}$$

式中，ω_{max}、ω_{min}为角速度的最大值和最小值。

为了使照明时不觉察到灯光闪烁，d值应满足下式要求

$$d\leqslant\left(\frac{1}{200}\sim\frac{1}{300}\right)$$

无闪烁运行时所需的最小飞轮力矩GD^2由下式确定

$$GD^2_{min}\approx\frac{K_eN_e}{dn^3}\times10^6\quad(N\cdot m^2) \tag{2.5-7}$$

式中，n为柴油机转速，r/min；N_e为柴油机的12h功率或连续功率，kW；K_e为系数，见表2.5-6。

表2.5-6 K_e的参考值

气缸数	冲程数	
	4	2
2	330～400	128
3	160～170	54
4	40～54	24
6	27～32	5.4

3.2 并联运行

柴油发电机组并联运行时，任一机组的负载或运行状态的变化均影响其他并联运行的机组和电网的平衡状态。为避免加入并联的机组因被此负载分配不当引起过大的环流或机组转速振荡，各机组应满足下述要求：

1）各台柴油机的调速特性曲线的开头形状和斜率基本一致，并呈下降趋势。保证当系统负荷增减时，参与并联的各发电机组承担有功功率的比例与各发电机额定功率的比例相同。两台功率相同时，允许差为±10%。

2）各发电机具有形状相同的外特性曲线，且外特性呈下降趋势，在发电机的自动电压调节器内有无功补偿单元（调差单元），以保证各机组运行在相同的功率因数时，即无功功率的分配比例和各发电机的额定无功功率比例相同。两台功率相同的发电机并联时，允许差为±10%。

对具有不可控相复励励磁系统的发电机，只能使用同功率、同规格的机组并联，并应采取相应措施。

3）柴油机调速器不振荡，且具有可变调速率装置，转速遥控机构的转速调整为每秒0.5%～1.5%额定转速。调速器能很快使机组达到稳定运行，不会造成因转速振荡而使发电机组间负荷来回转移，并引起电压波动。

4）发电机装有阻尼绕组，以提高并联运行的稳定性。

5）机组具有适当的飞轮力矩，使每台参与并联的发电机组的固有电磁振荡频率与参与并联的各台柴油机的任一谐波转矩的频率相差至少20%，以避免发生共振。通常，小型高速柴油机的GD^2足以满足要求，而对低速柴油机，应

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

核算 GD^2 值（见表 2.5-7）。

参与并联的各台发电机，其最大功率与最小功率之比应不超过 3∶1。当负荷的总功率约为并联运行发电机部分功率的 20%～100%时，各发电机实际承担的有功和无功功率比例分配值之差，应不大于各台发电机中最大额定有功和无功功率的±10%及最小值额定有功和无功功率的±25%。

并联运行时，无功功率分配的不均匀度按下式计算

$$\Delta Q = \frac{Q - Q_i}{Q_N} \times 100\% \qquad (2.5\text{-}8)$$

式中，Q 为某一负载下，发电机实际承担的无功功率，kvar；Q_i 为某一负载下，发电机按额定无功功率比例分配值，kvar；Q_N 为发电机额定无功功率，kvar。

有功功率分配的不均匀度 ΔP 按下式计算

$$\Delta P = \frac{P - P_i}{P_N} \times 100\% \qquad (2.5\text{-}9)$$

式中，P 为某一负载下，发电机实际承担的有功功率，kW；P_i 为某一负载下，发电机按额定有功功率比例分配值，kW；P_N 为发电机额定有功功率，kW。

3.3 柴油发电机运行中的主要故障及其原因和处理方法

柴油发电机的主要故障及其原因和处理方法见表 2.5-8。

表 2.5-7 柴油发电机与 50Hz 电网并联时所需最小的 GD^2 值

四冲程柴油机				三冲程柴油机			
r (min)	N·m² (kVA)	r (min)	N·m² (kVA)	r (min)	N·m² (kVA)	r (min)	N·m² (kVA)
150	3500	375	90	150	875	375	22.5
167	2280	428	53	167	570	428	13.2
188	1440	500	29	188	360	500	7.2
214	845	600	14	214	212	600	3.5
250	455	750	5.7	250	114	750	1.4
300	219	1000	1.8	300	55	—	—

表 2.5-8 柴油发电机的主要故障及其原因和处理方法

现象	原因	处理方法
不发电或电压太低	1. 转速太低 2. 接线错误 3. 剩磁电压太低 4. 线头松动或开关接触不良 5. 电刷和集电环接触不良或电刷压力不够 6. 旋转二极管损坏 7. 刷握生锈或损坏，电刷不能滑动 8. 励磁线圈断（短）路 9. 晶闸管（或大功率晶体管）损坏 10. 触发装置故障 11. 供给励磁的辅助绕组断（短）路 12. 相复励故障 (1) 电抗器、电流互感器线圈断（短）路 (2) 整定电阻太小 (3) 电抗器气隙太小	1. 测量转速，使其保持在额定值 2. 检查接线，使其正确连接 3. 用蓄电池充磁，注意极性 4. 拧紧接线螺钉，检查开关触头，用 00 号砂布擦净触头 5. 清洁集电环表面，使其与电刷接触良好，调整电刷压力为 1.5～2N/cm² 6. 用万用表检查二极管正反向电阻，更换已坏的旋转二极管 7. 用 00 号砂布擦净刷握或更换刷握 8. 找出断线处，重新焊接和包扎绝缘，或更换线圈 9. 更换损坏的器件 10. 拆下触发装置并检查、更换损坏的元器件或触发装置 11. 找出原因，排除故障，或更换辅助绕组 12. 检查相复励各元件 (1) 找出位置，修理或更换线圈 (2) 适当调整整定电阻值 (3) 重新调整气隙
电压太高	1. 晶闸管（或大功率晶体管）损坏 2. 励磁系统中有励磁分流回路时，分流回路各晶闸管损坏 3. 相复励装置中电抗器气隙太大	1. 更换损坏的管子 2. 更换晶闸管 3. 重新调整气隙
电压不稳或闪烁	1. 接线松动或电刷松动 2. 励磁系统中触发器参数不当 3. 并联电网中的故障或负荷不当	1. 紧固接线，重新调整电刷压力 2. 调整触发装置中 PID 回路的电阻值 3. 排除电网故障，去除不当负载

4 特殊试验

柴油发电机的特殊试验项目如下：

1) 电压整定范围检查试验。在发电机空载规定转速下，分别按要求在冷态和热态下进行。

2) 稳态电压调整率的测定。发电机在冷态或发热试验后立即进行。在 $\cos\varphi=1$ 和 $\cos\varphi=0.8$ 时，分别进行测定，并按本章式（2.5-2）进行发电机的稳态电压调整率计算。

3) 突加、突甩负载时发电机的瞬态电压调整率和恢复时间的测定。发电机空载或带一规定负载运行，分别突加或突甩负载，用示波器拍摄负载过程的电压、电流变化和时间，对示波图进行分析，即可获得。

4) 并联运行试验。本项试验可在发电机配柴油机后进行。如果在实验室由电动机拖动下进行，只检查发电机的无功负载分配不均匀度，以便了解发电机的自动电压调节器能否保证在发电机并联后负荷变化时仍能在额定功率因数下运行。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 6 章　同步电动机和同步调相机

1　同步电动机

同步电动机是交流电动机的一种类型，它的转子的转速与电源频率之间存在着恒定的同步关系

$$n=\frac{60f}{p}$$

式中，n 为转速，r/min；f 为电源频率，Hz；p 为同步电动机的极对数。

1.1　特点和用途

1.1.1　特点

1）转速恒定。在电机的运行过程中，只要电源频率一定，同步电动机的转速就不随负载的大小而改变。负载的变动只是使其功角发生变化。当负载增加时，功角变大，使电动机输出功率增大，直至与负载的增加相平衡为止。负载转矩或阻转矩增大到使电动机功角超过极限时，电动机则会产生失步。

2）功率因数可调。同步电动机可以通过调节其励磁电流，在超前的功率因数下运行，因而有利于改善电网的功率因数。

3）效率高。异步电动机的功率因数较低，效率也低。而相应的同步电动机则效率较高，尤其是低速同步电动机的这一优点更为明显。

4）运行稳定性高。在超前功率因数下运行的同步电动机，其过载能力比相应的异步电动机的大。而且，异步电动机的转矩与端电压的二次方成正比；而同步电动机，它的励磁电流不受电网电压影响，其转矩只是随端电压的一次方成正比变化。此外，当电网电压降低或电动机过负载时，同步电动机的励磁系统一般都能自动调节，实行强行励磁来保证电动机运行的稳定性。

1.1.2　用途

同步电动机主要用于传动恒速的（也可与变频装置一起用于调速的）机械，例如鼓风机、水泵、球磨机、气体压缩机、轧钢机以及大型船舶推进器等。

1.2　结构

同步电动机结构根据被传动机械的需要，分为卧式结构和立式结构。通常采用卧式结构。立式结构适用于传动立式水泵。它的结构和立式水轮发电机结构相似，一般采用悬式结构。结构上仅在支柱螺栓放在扇形推力瓦的位置有所差别，水轮发电机的支柱螺栓不放在扇形推力瓦的中心位置，使其形成一定的倾斜，便于推力轴承的润滑。而立式同步电动机则不然，需要放置在中心位置上。因为当电动机发生故障时，会发生水倒灌的现象，电动机发生反转，如支柱螺栓不放在扇形推力瓦的中心位置，将会影响推力瓦的润滑，从而损坏推力瓦。通常，反转的转速不会超过 1.5 倍的额定转速。

按其冷却方式同步电动机可分为上水冷、下水冷和侧水冷，这是指进行热交换的冷却器放置的位置而言。一般同步电动机（工频）均采用自通风的方式。自从变频调速同步电动机被大量采用在传动各种机械工况下之后，由于转速有时很低，有时甚至低至 28r/min，如果采用自通风是绝对不可行的，必须采用强迫循环通风方式。卧式同步电动机的总体结构如图 2.6-1 和图 2.6-2 所示。

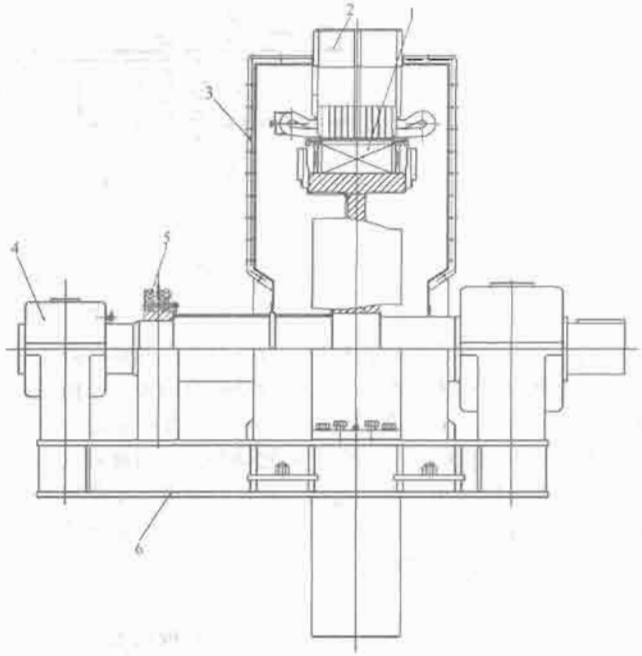


图 2.6-1　传动矿山磨机用的同步电动机
1—磁极装配；2—定子装配；3—端罩；
4—球面轴承；5—集电环；6—底板

1.2.1　定子

同步电动机的定子结构与同容量、同转速的异步电动机的基本结构相同，其基本结构参见异步电动机的有关章节。

1.2.2　转子

大多数同步电动机的转子采用凸极结构。当极数多、转速低的同步电动机直径与长度的比值较大时，其外形扁平（见图 2.6-1）。否则，轴向长度过大时，使得 l/τ 比值增大，当该比值过大会造成通风不利而引起转子温升高的后果。极数少、转速高的同步电动机直径与长度的比值较小，其外形变得细长（见图 2.6-2）。两极的同步电动机一般采用与汽轮发电机相同的隐极结构（参见汽轮发电机有关章节）。对于传动高炉鼓风机和烧结鼓风机的同步电动机而言，由于其被传动机械的转动惯量大而引起起动绕组温升过高或者转速过高，对转子强度有过高的要求而采用实心磁极结构之外，其余的凸极同步电动机均采用叠片磁极结构。

1.3　起动

同步电动机的起动就是同步电动机自接入电网直至转子达到同步转速的过程，为了完成这个过程，常采用以下几种方法：异步起动、调频起动（同步起动）和用辅助电动机起动。选用何种方法起动，可以根据电网所容许的起动电流、电动机的起动特性及被传动机械所需的起动转矩等方面来选择适当的起动方法。通常，大部分同步电动机采用异步起动

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

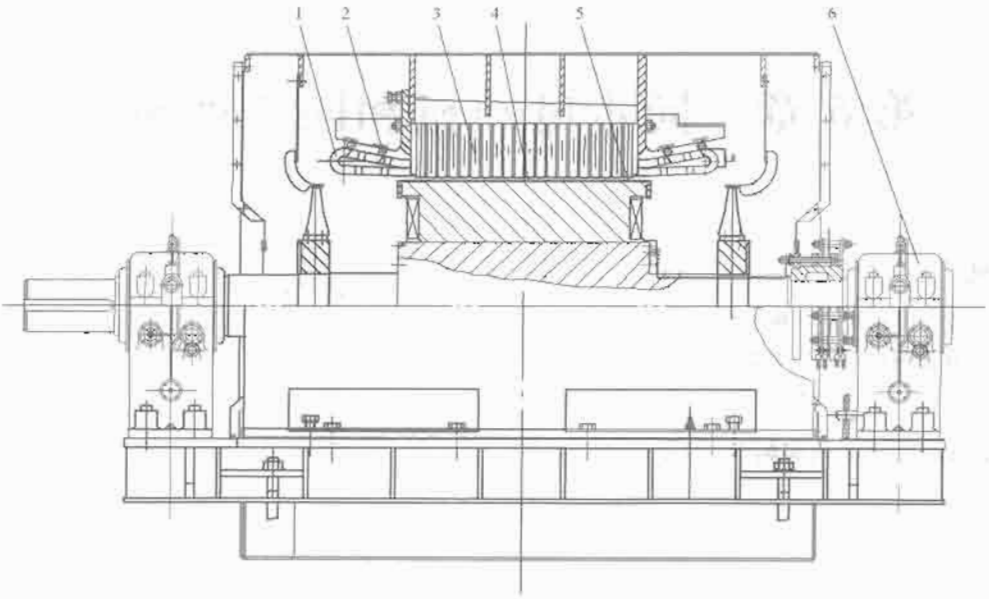


图 2.6-2 2000kW、1500r/min 传动烧结鼓风机用的同步电动机
1—定子绕组；2—端箍；3—定子铁心；4—实心磁极；5—励磁绕组；6—球面轴承

的方法，与笼型异步电动机相似，分为全电压起动和降压起动。当电网容量很大，在比较大的起动电流的冲击下而引起的电网电压降低，而不影响其他用电设备的稳定运行。当然，电动机也应能够承受比较大的起动电流而引起的电动力的冲击，则可以采用全电压起动方法，否则应采用降压异步起动方法。降压起动方法通常采用自耦变压器、电抗器和水电阻等方式进行降压起动。

1.3.1 异步起动

异步起动时主要依靠定子投入电网后磁极极靴上的阻尼绕组或实心磁极极靴表面感应电流与定子磁场间产生的异步转矩来进行起动。此时，为了避免励磁绕组在开路的情况下感应电压将绝缘击穿，必须将励磁绕组短接起来。在短接时，短接的励磁绕组中会流过较大的感应电流，感应电流与定子三相旋转磁场相互作用而产生的转矩，使得电动机的合成转矩在一半同步转速附近变小，出现最小转矩即所谓的单轴力矩效应。所以，起动时励磁绕组回路中应串联一个电阻值约为励磁绕组电阻值（15℃）的5～10倍的电阻器，以限制感应电流提高最小转矩，从而改善电动机的起动特性。

异步起动时，定子电流可达到6～7倍额定值，在起动电流的冲击下，定子绕组端部会受到很大的电动力而发生位移，还可能造成绝缘受损。为此，要对定子绕组的端部加以可靠的固定。例如，除在定子绕组端部装外端箍和定子线圈端部斜边间装热胀型玻璃毡外，还应在定子线圈上、下层之间的端部加装由特制的 ϕ20～ϕ50 尼龙护套玻璃丝束的软端箍和在定子线圈出槽口的直线部分装楔形分瓣的槽口垫块，来进一步加强定子绕组的端部固定。同时，在大的起动电流下，绕组会急剧发热。绕组的起动温升与机组的转动惯量和阻尼力矩有关，一般电动机空载起动时在转子起动绕组中产生的焦耳损耗与起动部件所获得的动能相等。起动温升的计算请参见有关章节。

空载或轻载异步起动的同步电动机在转差率达到0.05左右时，投入额定励磁电流即可顺利地牵入同步。在负载重或被驱动机械的转动惯量很大时（例如大型风机的转动惯量可高达电机自身转动惯量的8～10倍），起动后，投励时的转差率 s_1 应满足 $s_1 < s_{max}$ 的要求，而且要求 $s_0 < s_{max}$。s_0 是异步起动过程中可能达到的最小转差率（见图2.6-3）。s_{max} 是可能牵入同步的最大转差率

$$s_{max} = \frac{758}{n_N}\sqrt{\frac{K_f K_M P_N}{fGD^2}} \qquad (2.6\text{-}1)$$

式中，n_N 为同步转速，r/min；P_N 为额定功率，kW；GD^2 为电动机转子和负载机械的总飞轮力矩，N·m²；K_f 为投励时的励磁电流与额定励磁电流的比值；K_M 为静过载系数（参见本篇有关章节）。

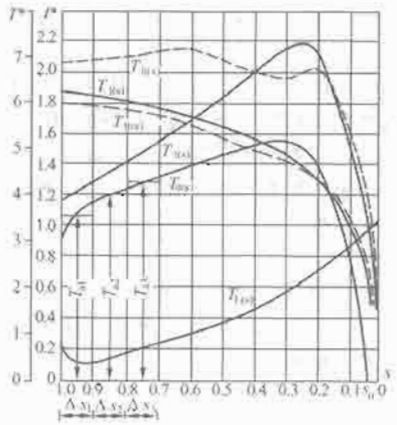


图 2.6-3 起动特性举例
I^*—电流标么值；T^*—转矩标么值；s—转差率；
s_0—异步起动过程中所能达到的最小转差率

1.3.2 调频起动（同步起动）

同步电动机可以采用静止变频装置实现平滑起动，其特点是：

1）起动平稳，对电网冲击小。

2）由于起动电流冲击小，可以不必过多地考虑电动机的加强设计和起动绕组的发热问题。

3）起动装置功率适度，空载起动时一般只为电动机功率的5%～7%（视起动时间、转动惯量和静阻力矩而异）。

4）几台电动机可以用一套起动装置，较经济。

5）便于维护。

用此法起动功率取自系统，可以起动数千千瓦，甚至数

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

万千瓦的同步电动机（参见本篇有关章节）。调频起动因设备费用高，目前实际上仅用于大容量、异步起动有困难的同步电动机上。

1.4　配往复式压缩机时飞轮力矩的选择

驱动往复式压缩机等机械时，作用于电动机轴上的脉动转矩将引起电动机转子的振荡，也就是引起电动机功角对于其平均值做周期性变化，从而使电动机的转矩和电流产生波动。后者增加了电动机的铜损耗，而前者可能导致线圈绝缘或者结构部件受到损伤。功率波动太大或发生共振时，还有造成电机失步的危险。对于电动机所连接的供电电网来说，由此而引起的电压波动则影响到同一电网上其他设备的正常运行。所以，对驱动往复式压缩机用同步电动机，要正确选择转动惯量，以避免发生共振，并限制电流波动在一个规定的范围内（参见本篇有关章节）。

1.5　同步异步电动机

1.5.1　特点和用途

同步异步电动机兼有绕线转子异步电动机优良的起动性能（起动电流小、起动转矩高且起动平滑）和同步电动机良好的运行特性（功率因数可调），但是它的结构和控制设备比较复杂。

当负载要求的起动转矩高达 2～5 倍额定转矩以上，且要求牵入转矩也很高，而电网容量又不太大时，或者负载机械的转动惯量很大的情况下，采用同步异步电动机是很合适的。

1.5.2　转子型式

同步异步电动机的定子和一般同步电动机的相似，其转子有隐极式和凸极式两种。隐极式转子和一般绕线转子异步电动机的转子相类似。这种电机的特点是，一旦因故失去同步时，它能作为异步电动机继续运行；而恢复正常后又很容易继续同步运行。凸极式同步异步电动机在极靴上设有起动用的多相绕组以代替一般的笼型绕组，并通过集电环与外接起动电阻器相连。这种绕组端部固定困难，多用于低速电动机。

1.5.3　转子绕组

隐极式的转子绕组要承担起动和励磁两种功能。选择其匝数时，应使起动时的开路电压不能太高，以便于选择合适的绕组绝缘结构；又要求励磁电压不能太低，以便于选配励磁装置。

隐极式的三相转子绕组一般采用星形联结。供给直流励磁时其接线方式常采用两种接线方式："Ⅰ"型接法和"Ⅱ"型接法（见图 2.6-4）。"Ⅰ"型接法亦称倍电流星形联结，其中 B、C 两种改成并联后再与 A 相串联。"Ⅱ"型接法在同步运行时仅两相串联使用。

凸极式同步异步电动机的起动绕组和励磁绕组是两个独立绕组，可以按满足各自的性能要求去考虑。

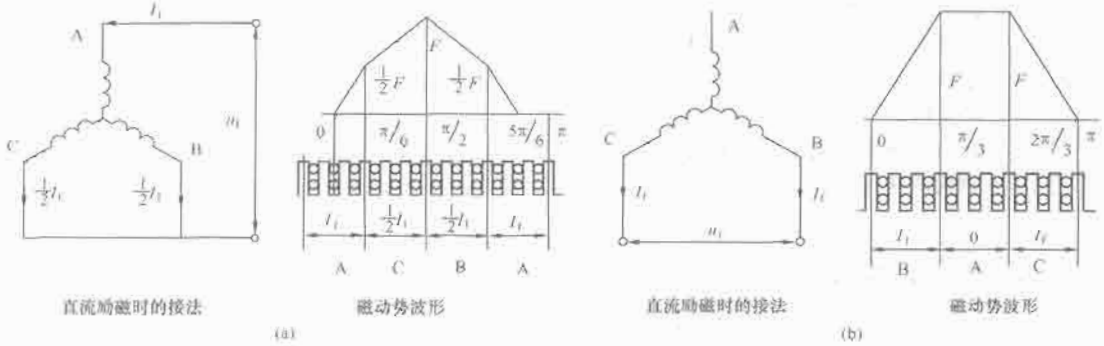


图 2.6-4　转子绕组直流励磁的接法
(a)"Ⅰ"型接法；(b)"Ⅱ"型接法

2　无换向器电动机

同步电动机由变频电源供电时，通过改变电源的频率，调节同步电动机转速来驱动要求变速的机械。这种由静止变频器变频调速，同步电动机以及转子位置检测器组成的调速电动机装置称为无换向器电动机。当变频调速同步电动机运行在基速至高速的调速范围内时，同步电动机的功率保持不变，即电动机的电压和电流保持额定值，而空载额定电压时，每极磁通为

$$\Phi = \frac{K_\Phi U_{ph}}{4.44 f W K_{dp}} \qquad (2.6\text{-}2)$$

式中，K_Φ 为磁场波形系数；U_{ph} 为定子相电压，V；f 为定子电压频率，Hz；W 为每相串联匝数；K_{dp} 为定子绕组系数。

当电机的几何尺寸确定之后，式中的 K_Φ、W、K_{dp} 均为常数，而相电压 U_{ph} 也保持不变。因此，磁通 Φ 将随着 f 的增大而减小。变频调速同步电动机是按照基速下的频率确定几何尺寸，由此可见，变频调速同步电动机在较高频率下运行时，其磁通是比较低的，从而导致转矩将随着磁通的减小而减小，该调速范围称为恒功率区。当变频调速电动机运行在基速以下时，则称为恒转矩区。当频率变化时，通过调节定子电压来维持磁通不变，见式（2.6-2），定子电流应保持额定值（此时要考虑功率下降对电机效率、定子电流的影响）。

变频调速同步电动机与直流电动机相比，其除具备有直流电动机宽广的调速范围之外，又没有换向器。因此，不受换相条件的制约，结构简单，维护方便。具有如下的优点：

1）容量能力系数。功率与转速的乘积 $P_N n_{max}$ 值，对直流电机而言，受换向能力的限制，通常其极限值为 3.0×10^6，而变频调速同步电动机则远远超过了这个限值，达到了 5.2×10^6，如果需要该数值尚有上调的空间。这是直流电动机单机所不能及的。

2）动态性能。GD^2/M_N 比值是影响电动机动态性能的主要参数，比值越小，电动机的动态性能越高，因此，被驱动机械的生产效率亦越高，而产品的质量也会得到改善。变频调速同步电动机的动态性能比起直流电动机来说，得到了显著的提高。

3）效率和节能。通过已生产过的变频调速同步电动机与直流电动机的比较，效率和节能效果是显著的。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4）结构简单，运行维护方便。直流电动机运行时，最重要的问题就是换向的问题，处理起来也非常棘手，因此，日常运行时必须有人经常的监护；而变频调速同步电动机却不需如此，运行中产生事故的可能性大大降低了，因此，维护也十分方便。

变频调速同步电动机可以看成是具有三个电枢绕组的直流电动机，并用晶闸管所组成的逆变器替代直流电动机的换向器和电刷。逆变器的输出频率是由装在同步电动机轴端上的位置检测器提供的信号控制。因此，逆变器的输出频率与电动机的转速严格保持同步，不存在失步问题。

因静止变频器的不同，有用于交-交变频系统的所谓交流无换向电动机和用于交-直-交变频系统的所谓直流无换向器电动机。交-交变频系统的输出频率受到一定的限制，一般为电源频率的1/3～1/2以下。交-交变频器输出三相交流电压大小可连续调节。变频装置输出电压为0～1650V，经降压变压器接到6kV或10kV电网上。

采用磁场定向矢量控制的交-交变频同步电动机调速系统广泛应用于钢厂的粗轧机或连轧机、矿井提升机的传动上，也用于低速大容量的传动。例如，磨机和回转窑等，它具有很好的静、动态性能。

目前交-交变频磁场定向矢量控制同步电动机调速系统可制造单机容量为2000～12000kW，过载系数为2.5～2.7倍。

图2.6-5中的同步电动机MS在其定子三相引出线与电源之间，接入交-直-交变频电流型变频器，再加上电机轴上安装的位置检测器PS以及相应的控制装置，构成了交-直-交变频调速系统。它的主电路是由整流桥、逆变桥和平波电感L_d所组成的。其中整流桥是将三相50Hz交流电整流为直流电，逆变桥则是将直流电再变为电压、频率大小可变的交流电，实现对同步电动机调速控制。

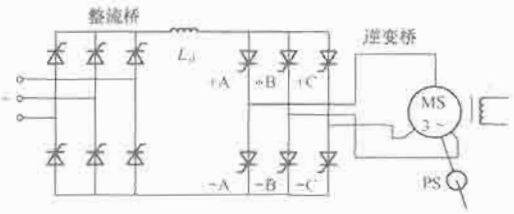


图2.6-5 交-直-交变频电流型无换向器电动机调速系统

无换向器电机调速系统运行时，其整流桥、逆变桥电流中谐波含量很大，除了对电机本身产生不利的影响外，对供电电源也有影响。例如，使电源电压发生畸变，影响电网中其他用户的正常用电。因此，解决变频器产生的谐波问题，是具有重要意义的。

2.1 工作原理与调速控制

无换向器电动机的工作原理与直流电动机相似，从转速方程中可以看出

$$n=\frac{E_D-I_D\Sigma R}{K_e\Phi\cos\left(\gamma_0+\frac{u}{2}\right)\cos\frac{u}{2}}$$

$$E_D=2.34U_{2D}\cos\left(\alpha+\frac{u_c}{2}\right)\cos\frac{u_c}{2} \qquad (2.6\text{-}3)$$

$$K_e=\frac{\sqrt{3}}{10}pK_{dp}N_\Phi$$

式中，I_D为整流器输出电流［见图2.6-6（a）］；E_D为整流器输出电压；ΣR为直流回路等效电阻，包括电源侧电阻，平波电抗器电阻，电动机两相电阻，以及两个晶闸管正向等效电阻；Φ为电动机每极磁通；γ_0这逆变器换流超前角［见图2.6-6（b）］；u为逆变器换流重叠角［见图2.6-6（b）］；U_{2D}为整流变压器二次相电压；α为整流器延迟角；u_c为整流器换流重叠角；K_e为电动势常数；p为电动机极对数；K_{dp}为电动机绕组系数；N_Φ为电机每相串联匝数。

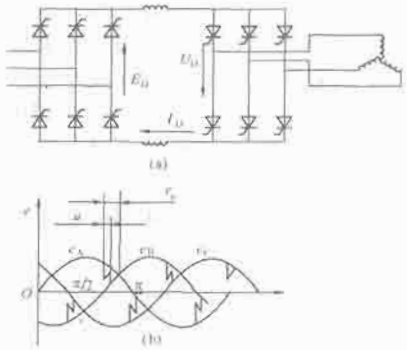


图2.6-6 工作原理图
（a）主电路；（b）电压波形

由上式可见：

1）无换向器电动机转速公式与直流电机转速公式$n=(U-I\Sigma R)/C_E\Phi$是很相似的。

2）调节α角可以改变E_D，由调节E_D进行调速，它相当直流电机调压调速。

3）调节ΣR相当于直流电机串接电阻调速，但耗能很大，一般不用。

4）改变励磁电流，调节磁通Φ大小也可以调速，相当于直流电机调节励磁调速。

5）改变换流超前角γ_0也可调速，相当于调直流电机电刷位置调速。

上述2）、4）、5）三种调速方法的特性如图2.6-7所示。

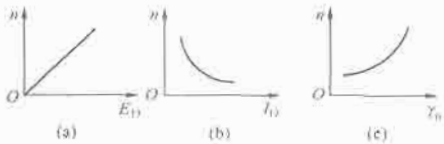


图2.6-7 三种方法的调速特性曲线
（a）调电压调速；（b）调励磁电流调速；（c）调γ_0角调速

由于无换向器电动机的工作原理与直流电机相似，可以用与直流电机相似的控制方法进行控制，尤其是在控制要求不高的场合，如驱动水泵、风机等。这种控制一般包括两个内容：一个是作为无换相器电动机的逆变器按旋转位置导通的控制；另一个是与直流调速系统控制电枢电流相似的相电流的控制。但是在一些动态控制要求高的场合，如驱动轧钢机，矿井提升机的传动中还需采取控制精度更高的矢量控制技术。

2.2 变频调速同步电动机特点

变频调速同步电动机结构与一般同步电动机相似，转子结构可以做成凸极式的转子，也可以做成隐极式的转子。由变频电源供电的变频调速同步电动机的特点为：

1）电动机的转速是由被传动的机械所决定的，但是电动机的极数或频率则由系统设计按器件性能、变频系统方式以及电动机的结构决定的。一般不希望选用很高的频率，以

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

降低损耗，转速在 3000r/min 以上电动机一般采用两极的，但有时为了提高临界转速也可以采用四极的。

2）电动机的额定电压因受变频装置器件耐压水平的限制而比一般的电动机要低。目前，额定电压有 1650V、3300V，最高为 6600V。具体数值的选择要按功率的大小、变频系统的类型与器件的性能决定。

3）电动机电枢绕组是换流电路的一部分，电动机的超瞬变电抗构成了逆变器的换流电抗，它将影响到换流重叠角，从而影响电动机的转矩特性。因此，电动机的超瞬变电抗应控制在一定的范围之内。为达到此目的，可以通过改变电机的主要尺寸、定子槽形高宽比，改变阻尼绕组和阻尼孔槽口高宽尺寸来达到。

4）变频系统由于含有大量的谐波，使得电动机的损耗增大，并产生转矩脉动。为了适应谐波的影响，对电动机的设计提出要求：

① 高转速电动机定子绕组的股线铜截面积及高宽比要适当减小，以降低铜损耗。定子绕组端部结构件采用非磁性材料，以降低附加损耗。加装阻尼绕组，以降低转子表面或磁极表面的损耗。

② 大功率电动机采用六相双 Y 移 30°的定子绕组以降低谐波电动势，一方面可以降低损耗；另一方面可以降低转矩脉动。

③ 设计转子结构时要注意避免脉动转矩引起的轴系扭转共振，在强度方面要考虑脉振转矩所引起的疲劳。

5）大型高速变频调速电动机的转速调节范围内要避开转子横向谐振频率。对电动机转子要做好动平衡，对轴承要加强阻尼，以避免通过临界转速时的过度振动。

2.3　变频调速同步电动机结构

变频调速同步电动机由于它所驱动的机械不同，因而其结构上也有很大的差别。例如，驱动轧钢机的变频调速同步电动机又分为粗轧和精轧，传动粗轧机的电动机大部分为双辊轧机，因此，变频调速同步电动机又分为上辊电动机和下辊电动机。按上、下辊电动机分布的位置又分为上辊在前和上辊在后两种。其安装的方式也各有不同，目前这两种安装方式均被广泛采用。无论哪一种安装方式，2 台电机共用 5 个轴承支撑，其中一个轴承是用来支撑中间轴的。由上、下辊电动机两个轴之间的距离远远大于两个轧辊之间的距离，因而连接轴不是水平的，存在一个很大的夹角。在轧钢的过程会造成一个很大的轴向推力。所以，粗轧电动机设置强有力的止推轴承是十分必要的。而精轧电动机通常是单辊轧机，电动机与轧辊之间通过齿套联轴器进行连接。因此，正常运行时，电动机是不承受轴向力的（斜槽电动机除外）。但考虑到轧钢时往往会出现轧辊断裂的现象，断裂通常与轴向成 45°方向发生，因而此时也会出现轴向力。为保护电机自身的安全，也会加装能够承受一定轴向力的轴承。当驱动冷轧和高速线材的变频调速同步电动机也具有其各自的特点。变频调速同步电动机当应用在矿井提升机时，其结构又产生了变化，它与提升机采用锥套式结构，即电机本身没有轴承也没有轴，通过一定紧量热套到提升机的轴上，把合后，传动提升机。

2.3.1　定子

（1）定子铁心

定子冲片的材质通常采用高导磁、高损耗的硅钢片，牌号为 50W600 或 50W540 而不采用 50W310，因为变频调速同步电动机除极特殊的场合外，大部分均运行在低频状态，而铁损值的大小是和 $(f/f_{50})^{1.3}$ 有关。尽管采用了高损耗的硅钢片而铁损增长的并不大。高导磁的特性却使得转子励磁电流降低了很多，是值得的。

目前，定子铁心多数采用直槽结构，也有采用斜槽结构的，斜槽结构通常斜一个定子槽距。当采用斜槽结构时，可以大大减小齿谐波及其所产生的寄生力矩。斜槽的扭斜是靠数控冲床来实现。数控冲床按照预先编好的程序，同一层的定子冲片尺寸和形状完全一致，当冲下一层冲片时，冲片槽中心要平行移动一个量值。该量值的大小取决于冲床的精度，一般约为 0.01mm，每一层冲片均进行编号，然后，按冲制顺序叠成铁心，铁心的斜槽如图 2.6-8 所示。为了减小由于槽平行移动而造成的槽口处及定子槽底部尺寸的微小偏差，而标准槽形的定子冲片定位在定子铁心轴向长度的中心位置上（即不考虑该处是位于通风沟，还是铁心中心位置上）。这可以使这种偏差小一半。由于采用了斜槽，每层冲片间都将发生一定的位移，当扇形片位移到其边缘齿冠处小于 3mm 时，数控冲床自动将这部分剪掉。

斜槽结构的优点是可以消除齿谐波，定子冲模为单冲头，制造成本低，选择优化设计时提供了方便。缺点是工艺性不好，铁心装压时，必须按照冲制的顺序进行叠装。

定子通风槽板的种类和布置按图 2.6-9 处理。

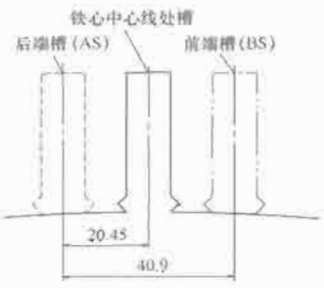


图 2.6-8　由槽平行移动形成的斜槽

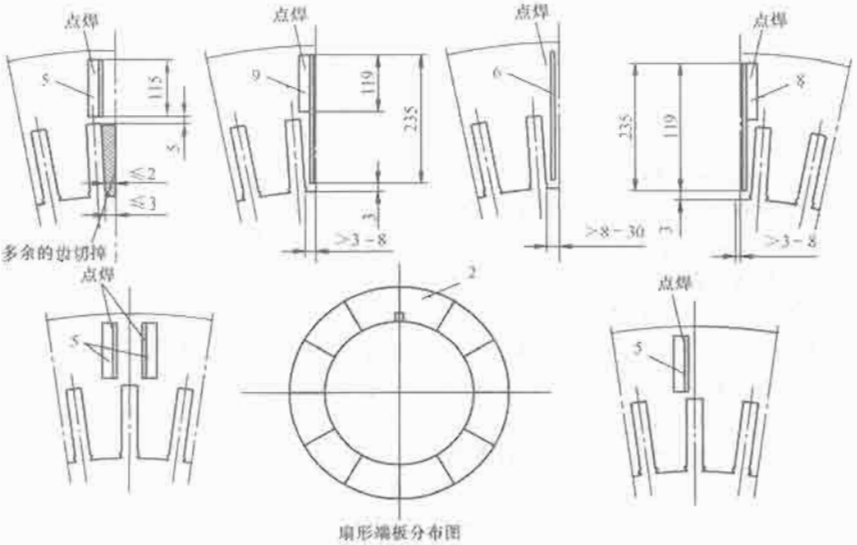


图 2.6-9　通风槽板布置图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

定子齿压板有磁性的和非磁性的两种，目前磁性的压指均是按照定子槽的形状割出来的，压指和槽壁之间距离为5mm。当考虑到定子端部漏磁的因素时，可以采用非磁性的定子齿压板。一种可以用非磁性钢板点焊在通风槽板上；另一种定子齿压板采用非磁性铸硅黄铜 ZCuZn16Si4。铸铜件不允许有砂眼、夹杂物和局部缺陷，防止由此引起压板断裂，造成恶性事故。因此，铸件必须经过探伤检查合格后才能进行机械加工。压板加工成向内倾斜 2.5mm，如图 2.6-10 所示，目的是为了防止产生齿胀现象。然后再将两块加工完成的压指用铆钉铆在定子通风槽板上。

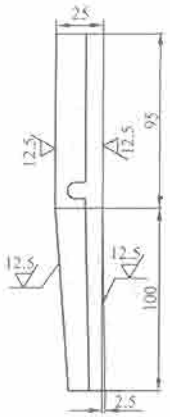


图 2.6-10 压指

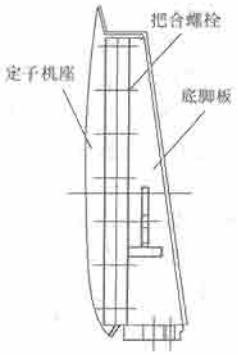


图 2.6-11 机座与底脚板合缝板结构

(2) 定子内机座

电机的结构型式在某种程度上受到工艺装备的限制，机座的结构就是如此。因为任何一个工厂的真空浸漆设备尺寸都是有限制的。因此，对于大型电机而言，其尺寸超出浸漆罐所允许的尺寸时，定子机座则需要采取分离结构，整浸后再组装。通常可以采用两种方法，一种采用后焊底脚板的结构，或底脚板与机座之间通过合缝板再用把合销螺栓连接起来的方法，如图 2.6-11 所示。另一种采用内外机座结构，这是最常见的，如图 2.6-12 所示。

内机座是由钢板 Q235 拼焊而成的结构。所有焊缝焊接方法均采用 TIG。在每个拉紧螺杆与所处机座板的位置上焊一个固定块。使定子铁心在轴向分成若干分，从而增加铁心的刚度。铁心装压后，其翻身、吊运过程中均可保证基本不

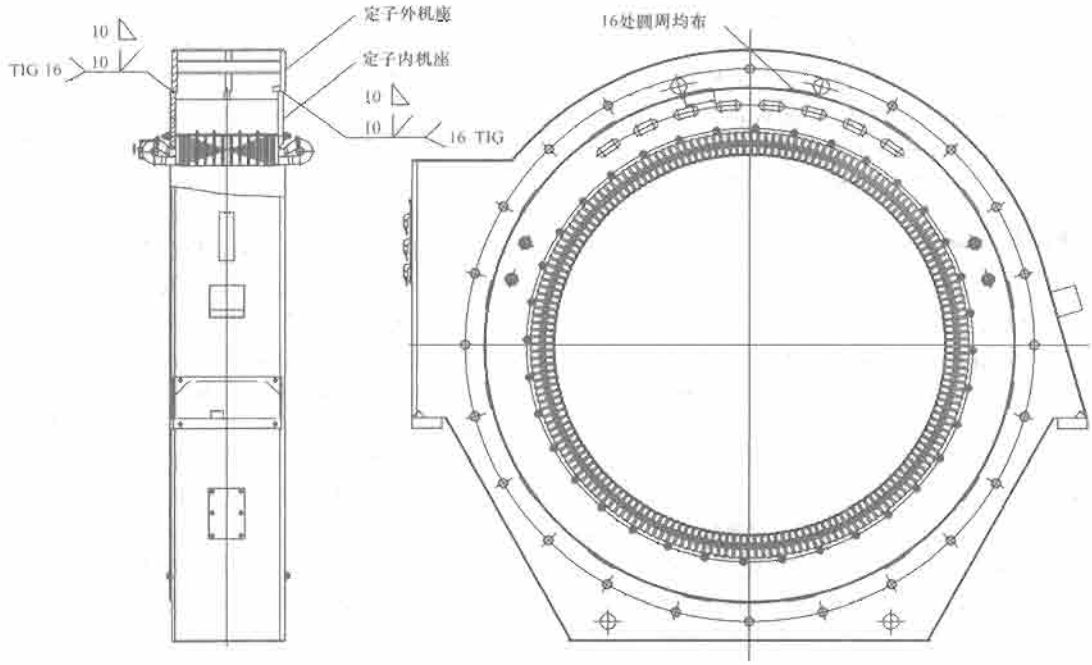


图 2.6-12 定子内外机座结构

变形的要求。

(3) 定子线圈和绕组铁心

定子线圈为双层叠绕组，线圈横向采用双排或三排铜线并绕。线圈可以采用模压或白胚下线绝缘结构。当采用模压时，在线圈出槽后直线部分与端线部分之间的弯折处，需要采用特制的铁夹板，使线圈在模压过程中，防止挤出来的胶在此处形成包块，从而影响线圈下线。定子绕组两端端部设置一道或两道端箍，端箍的材质可由圆钢 Q235 弯制成型，再包以 0.14×25 聚酯薄膜玻璃粉云母带——云 446-1C 和 0.1×25 涤纶带。或者由 ϕ10 绝缘软端箍缠绕几道而成。线圈内端箍由 500～800mm 的几段涤波填充管组成。放置的轴向位置应和外端箍处于同一直线上。线圈斜边间隙中用涤纶毡包以热胀型玻璃毡塞紧，整浸固化后与线圈形成一个整体，这样，当电机的负载发生冲击性变化时，线圈端部遭受到冲击力。如果内外端箍不在一条直线上时，线圈端部将产生一个弯矩，可能造成线圈端部绝缘损伤。变频调速电动机由于功率大，电压较低，定子额定电流一般情况都非常大，定子绕组并联支路数亦多，因此，极间连接线均采用铜环结构。此结构简单、可靠，布置在非传动端的机座板上。

当变频调速同步电动机采用双 Y 变频电源供电时，定子极间连接线（铜环）应当布置在非传动端和传动端两端。定子线圈制成正、反胀形各一半，使得布置、接线变得简单、可靠，如图 2.6-13 和图 2.6-14 所示。

在三相 60°相带电机里，由基波电流产生的定子磁动势包含 5、7、11、13、17、19、23、25、29、31 等次谐波，它们在转子表面引起较大损耗（涡流损耗和磁滞损耗）。现在改用六相双 Y 移 30°绕组，则可以消除 5、7、17、19、29、31 等次谐波。这时只剩下 11 和 13 次谐波存在，可以采用线

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

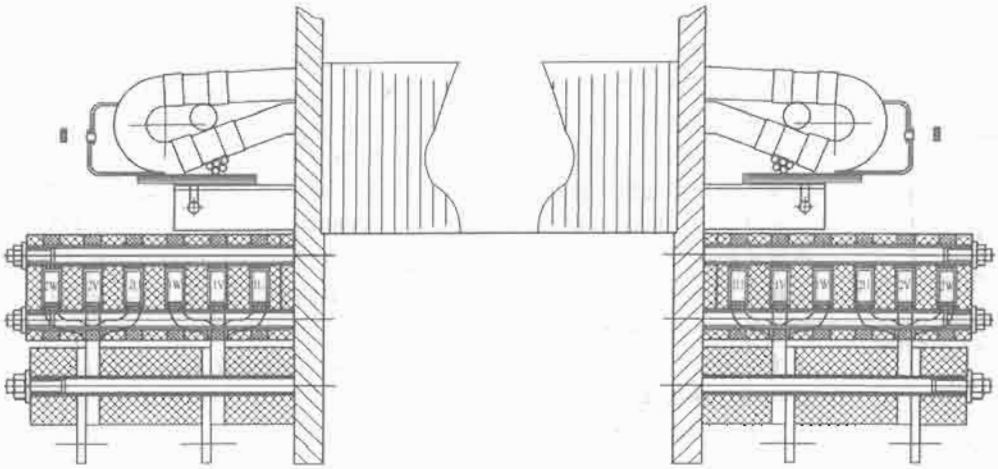


图 2.6-13　双变频供电的电动机端部结构

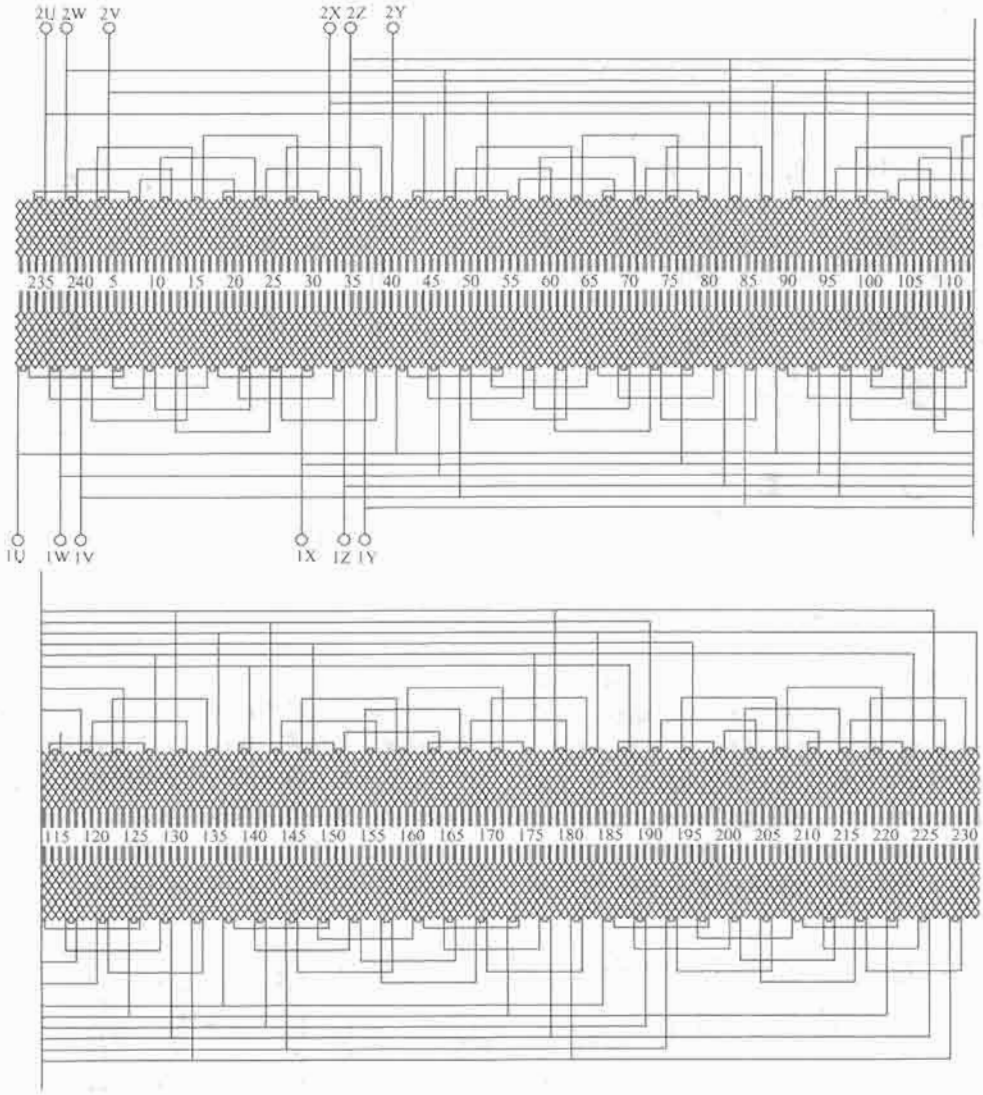


图 2.6-14　双变频电源供电电动机定子接线图

圈的短矩为 $\beta=11/12$ 来削弱 11 和 13 次谐波。定子磁动势中，除齿谐波之外，只存在次数较高而幅值较小的 23、25、35、37 等高次谐波。因此，即使气隙很小，它们在转子表面引起的损耗也小到可以忽略不计，从而可以提高电机的效率。

当每极每相槽数 q 接近无穷大时，定子磁动势谐波引起转子表面损耗和线圈短矩比 β 的关系如图 2.6-15 所示。

图中纵坐标 ϕ_1 为计算表面损耗的系数。当电机几何尺寸和线负载不变时，表面损耗系数与 ϕ_1 成正比。从图中可以看出，三相电机最小的表面损耗出现在 $\beta=5/6$ 附近，否则表面损耗会迅速增大。而对于双 Y 移 30°的电机表面损耗最小的 β 值有好几个，如 11/12 和 3/4 等。因此，短矩比的选择就宽广得多。

众所周知，相带越狭则绕组的分布系数 k_q 越大，六相双

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

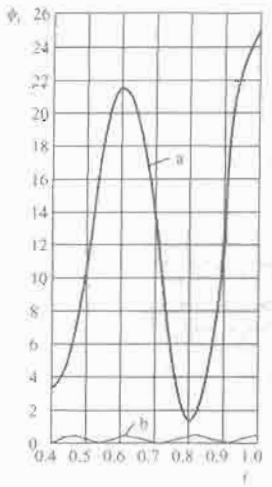


图 2.6-15 转子表面损耗与短矩比的关系

Y移30°绕组从电机里面看是空间分布30°相带绕组，因此，其分布系数比通常的三相60°相带绕组大。再加上六相绕组的短距比 β 可取得比三相绕组大得多，由此可见，六相双Y移30°绕组系数 $k_w=k_q k_y$ 可以比三相电机的高很多，从而提高电机有效材料利用率。由于上述的六相双Y移30°绕组的变频调速同步电动机具有如此的优点，目前这项技术得到了越来越广泛的应用，尤其是对于大容量的变频调速系统更具有美好的前景。

2.3.2 转子

(1) 磁极铁心

磁极冲片通常是采用1.5mm钢板Q235或16Mn冲制而成，极靴表面可以为由三段圆弧组成，也可以是 $\delta_{max}/\delta=1.5$ 的圆弧。极身上冲有4～6个拉紧螺杆孔，孔有两种，其中斜角相对分布着两个销孔，它不但起拉紧作用外，还起着定位棒的作用，其余的为拉紧螺杆孔，如图2.6-16所示。

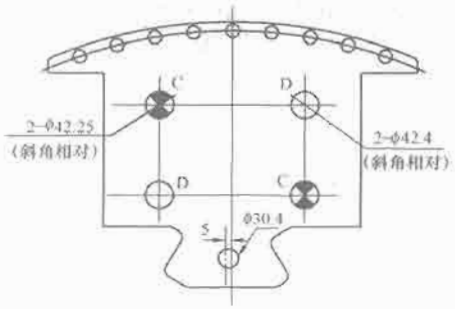


图 2.6-16 磁极冲片

一般同步电动机磁极冲片通常采用"T"尾结构，只是在个别情况下才采用鸽尾结构。变频调速同步电动机，尤其是驱动轧钢的变频调速电动机，由于它不但承受着离心力，冲击性负载下的电磁转矩，同时还要承受着由静止状态在极短的时间内（极限为 $\Delta t=0.25s$）升至额定转速，以及由额定转速在同样短的时间内降至零转速，由此造成转动部件受到很大的惯性力的冲击。而"T"尾结构时磁极冲片"T"尾与磁轭冲片"T"尾槽之间采用斜键径向撑紧。而侧面是存在间隙的，这对安全稳定运行是不利的。鸽尾结构则可以克服这个缺点，因为它可以同时承受径向和切向力。

(2) 磁极线圈

磁极线圈结构采用两种结构，一种是扁绕结构，另一种是拼焊结构。无论是何种结构，均采用带散热匝的磁极线圈。磁极线圈的匝间绝缘是垫两层上胶聚芳酰胺纤维纸，首末各三匝垫三层。扁绕结构时散热匝是靠垫环氧玻璃布板在扁绕时将扁铜线挤出去而形成的，如图2.6-17所示。在磁极线圈上、下及内侧均采用上胶聚芳酰胺纤维纸热压成型作为主绝缘。当磁极线圈图扁铜线宽与高之比超过一定的值以后，再采用扁绕工艺，就比较困难，应采用拼焊结构。

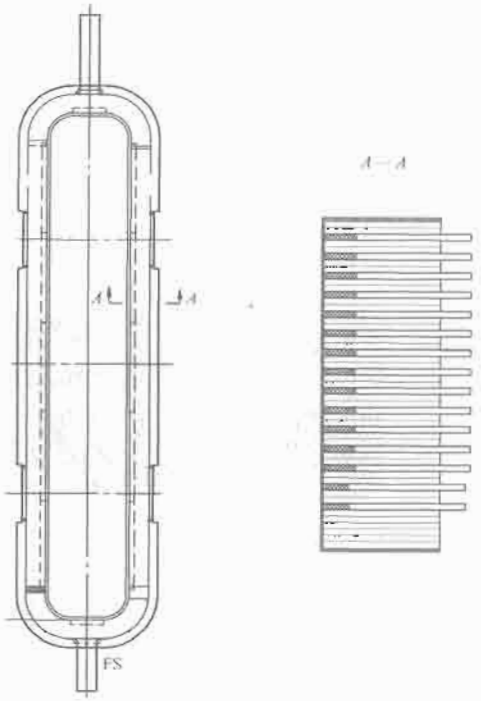


图 2.6-17 扁绕磁极线圈

隐极同步电动机转子线圈所采用的是双涤纶玻璃丝包绕结铜扁线绕制而成，现以一个6极隐极转子为例来说明。该转子每个极由6种不同尺寸的线圈构成，相邻两个极上最里面的最小尺寸的线圈和最外面的最大尺寸的线圈有所不同，其余线圈是一样的。因此，6极电机转子线圈共有7种，它们的绕制方向和尺寸如图2.6-18所示。

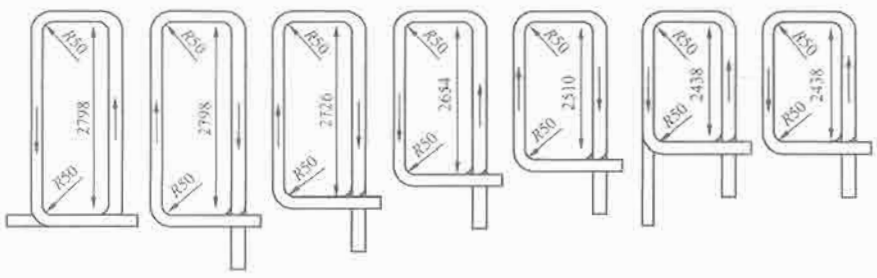


图 2.6-18 转子线圈

线圈制作完成后，装上放置转子线圈的绝缘环，按照引出线的具体分布情况，在绝缘环上人工配制出不同形状的引线槽，以便布置转子线圈引线。转子线圈嵌线前，需要在槽内放置槽衬绝缘，然后再嵌线。转子线圈嵌线后，按图2.6-19进行引线的连接。

每极所使用的相应转子线圈种类见表2.6-1。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 2.6-1　　线圈种类

磁极编号	线圈编号
1	2，3，4，5，6，7
2	1，3，4，5，6，8
3	2，3，4，5，6，7
4	1，3，4，5，6，8
5	2，3，4，5，6，7
6	1，3，4，5，6，8

转子线圈端部固定是 6 种不同尺寸的线圈端部分别布置在 6 个绝缘环上，在其所形成的 5 个线圈端部间隙中的 3 个，在图 2.6-20 中画有剖面线位置上放置 8mm×120mm×120mm 热膨胀玻璃丝毡。而在线圈端部直线部分垫入 8mm×52mm×100mm 热膨胀玻璃丝毡。因此，可以将线圈端部彼此撑紧且又不影响通风效果。

电机运转时，为防止线圈端部发生破坏，在线圈端部进行无纬带绑扎，绑扎的位置是在垫入热膨胀玻璃丝毡和相邻两个线圈端部进行的。绑扎前要垫平，预扎，防止无纬带强度受到削弱。

对于拼焊的扁铜带应采硬铜母线，而且对其波浪度和镰刀弯均应提出要求，防止磁极线圈拼焊后尺寸偏差太大，影响磁极线圈套线。硬铜母线按照要求进行加工，然后银焊（中频焊），在两个扁铜线焊接角部再焊一个三角形的加强筋，以增加焊缝的强度，其绝缘与扁绕结构的一样。

变频调速同步电动机在矿井提升机中同样也获得了广泛的应用，它的结构除了锥套结构和无轴之外，其余基本上与变频调速电动机是一样的，锥套结构如图 2.6-21 所示。

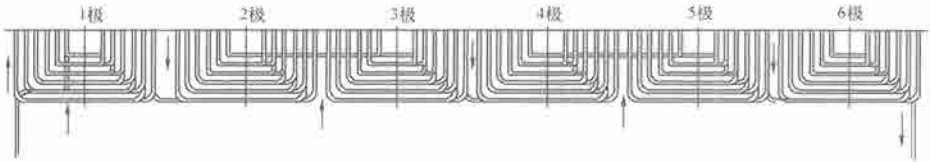


图 2.6-19　转子线圈引线连接

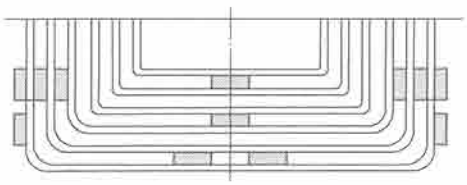


图 2.6-20　转子线圈端部固定

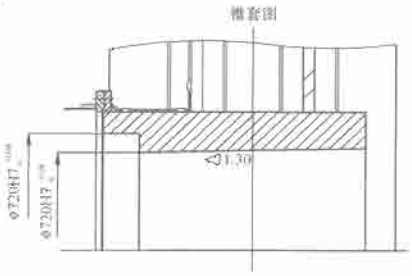


图 2.6-21　提升机的锥套结构图

2.3.3　轴承

（1）不承受轴向推力轴承

变频调速同步电动机除驱动高速线材变频调速电动机之外，一般情况下均是在中低速工况下运转，尤其是粗轧的电动机转速是低至 28r/min，这种转速下，油膜很难建立起来，因此高压油顶起的技术显得十分必要。另外一点就是为了提高变频调速电动机的动态特性，除了减小转动惯量以外，高压油顶起也是一个重要条件。

（2）承受轴向推力的轴承

当变频调速同步电动机承受很大的轴向推力，这种轴向推力高达 500kN，甚至大于该数值。因此轴承采用止推装置显得十分必要，其中，振动阻尼装置就是一种。首先介绍一下振动阻尼装置结构，如图 2.6-22 所示。

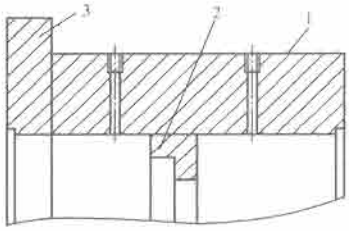


图 2.6-22　振动阻尼装置结构

图中序 3 焊在序 1 上，然后加工出凹槽，供将来安装浮动密封环用，再用压板将浮动密封环固定住。在序 3 的两侧序 1 上各钻一个 ϕ11 孔，用于安装两个油室油量调节阀。浮动密封环将由推力盘与左右止推瓦及推力盘与振动阻尼罩所形成的空腔分成左右两个油室。例如，当电机受到向非负载端方向的冲击力时，则推力盘随着轴一起向图中左方冲击，使左油室的油压遽然升高，阻止推力盘向左冲击，对冲击起到了阻尼作用。同时，左油室中被压缩的油，一部分通过调节阀油管流入设置在顶部的油箱中。左油室的被压缩的油不能直接通过左侧单向阀回流到油箱中。由于右油室的负压，油可以从油箱经右侧单向阀流入右油室，右油室的油得到了及时的补充。该轴向冲击力经止推盘传递到振动阻尼盖上。振动阻尼盖由多个螺栓固定在振动阻尼罩上。螺栓的材质及数量均要合适。否则将引起严重的后果，振动阻尼盖把合螺栓的拉应力为

$$\sigma_1 = \frac{Q}{nF_0} \quad (\mathrm{N/cm^2})$$

式中，Q 为最大轴向推力，N；F_0 为螺栓最小截面积，$\mathrm{cm^2}$；n 为螺栓数量。

当轴受到向右的冲击力时，会出现方向相反同样的过程。而冲击力由将推力盘把合在轴端的螺栓所承受，因此螺栓的拉应力也是要计算的。因为推力盘是把在轴端上，这种结构只能用在非传动端上。止推轴承的另一种结构是轴向力通过 ZCuSn5Zn5Pb5 材质为铸锡青铜止推盘传递给固定在轴承座并通过油孔润滑的压圈上，该轴向力被轴承座下的键和把合螺栓所吸收。这种止推轴承优点是可以装在电机的传动端也可以在非传动端，按需要而定。缺点是轴向冲击力直接冲击轴承座，而振动阻尼装置是有一个缓冲作用。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3 同步调相机

3.1 特点和用途

同步调相机是一种特殊设计的，显著过励或欠励的同步电机，这种电机用来改善电网的功率因数或用作调整输电线路径端和中间各点的电压数值。

同步调相机能发出或吸收无功功率，所以它总是在$\cos\varphi=0$的状况下运行。过励运行时相当于电容器，发出无功率；欠励运行相当于电抗器，吸收无功率。

3.2 结构

隐极同步电机的$x_d\approx x_q$，电磁功率中的附加分量为零，即当励磁电流为零时，无功率输出。为了得到较大的滞相容量，同步调相机多制成凸极转子式的。

空冷的凸极同步调相机的结构型式与凸极同步电动机的相同。同步调相机不传动其他机械，没有轴伸，所以对容量在30MVA及以上的大型同步调相机，宜采用氢气冷却，因为不需对旋转零部件进行氢气密封，使密封结构简单。氢冷的同步调相机整个外壳（包括机座和端罩）犹如一个氢气的密封容器。为了避免氢气加剧电刷和集电环的磨损，氢冷调相机宜制成无刷励磁结构。由于氢冷同步调相机密封良好且不传动其他机械，有条件时，可安装于户外，以节约基建投资。

3.3 起动方法

同步调相机容量一般都比较大，但是它不带机械负载，对起动转矩要求不高，在选择起动方法时主要考虑是起动电流对电网的影响。常用的起动方法是降压异步起动，也可以采用辅助电动机的起动方法。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第7章　其他类型同步电机

1　中频发电机

中频发电机是用以发出单相或多相中频电能的特种同步发电机。中频频率范围为高于工频至10000Hz。

中频发电机主要用于冶金、机械、纺织、汽车、航空、矿业及国防等行业或部门需要中频电源的地方，如金属感应加热、照明、充电、高速电动机的电源及检测试验电源等。

400Hz以下的中频发电机通常以增加一般同步电机的极数或提高原动机（或电动机）的转速来实现。频率高于400Hz时，一般采用感应子中频发电机，但是在1500Hz以下也广泛采用类似凸极发电机的爪极发电机。

随着电力电子技术的发展，各种各样的交流变频装置相继出现，已经或正在取代传统的变频机组，特别在感应加热领域。此外，由于整流技术的完善，一些原来用直流发电机的汽车用发电机也大都被爪极发电机所取代。

1.1　爪极发电机

爪极发电机的转子结构是凸极结构的一种变形，一般凸极电机的励磁线圈是绕在每一极的极身上的，而爪极的励磁线圈是公用的，套装在磁轭上。磁轭则分成两个环，分别与爪极铸成一体，每个环上的爪极数为总极数的一半，组合时爪极相对交错，在励磁线圈激励下，形成N、S极交替的磁场。图2.7-1为爪极发电机的剖面图及转子展开图，其中有刷结构的励磁线圈在转子上，无刷结构的励磁线圈在定子上，为了固定励磁线圈，在磁路上增加了δ_1和δ_2两个附加气隙，励磁功率要大些，有附加气隙的那个爪极组用无磁性环嵌在另一爪极组上。较大容量的爪极电机可采用上述两者的组合，以增加电机长度而不显著地增大直径。

爪极发电机的工作原理和凸极发电机的相似，极间漏磁通比一般凸极电机的要大些，电枢反应对端电压的影响也要大些。

爪极发电机结构简单，其转速可达6000r/min或以上，最大输出可达30kVA，大量用作汽车和列车的照明电源。

1.2　感应子发电机

1.2.1　特点

感应子发电机的工作原理是基于转子（也称感应子）表面齿槽的存在，在转子转动时，因气隙磁导变化引起中频绕组中的磁链发生周期性的变化而感生电动势，与一般同步电机相比，有以下一些特点：

1）它的励磁绕组和工作绕组都装在定子上，转子上没有绕组，因而不要集电环和电刷，结构简单，可靠性高，维护方便。

2）气隙磁通的利用率低，只有其交变分量被利用来感生电动势，而交变分量一般只占全部气隙磁通的35%～45%，因此，这种电机的有效尺寸要比同功率一般同步电机的大。这种电机的用铁量多而用铜量少。

3）内电抗较大，因此，短路电流较小，而当负载为感性时，其固有电压调整率较大，故通常要求在超前功率因数下工作。

4）由于电机磁路饱和后，气隙磁通的交变分量变小，电机的空载特性和短路特性都有一个驼峰，即在励磁电流达到一定数值后继续增大时，空载电压和短路电流非但不增加，反而下降。

5）由于工作频率高，铁损耗较大，感应子中频电机效率比工频同容量同步电机的要低，而且要重视铁心冷却问题。

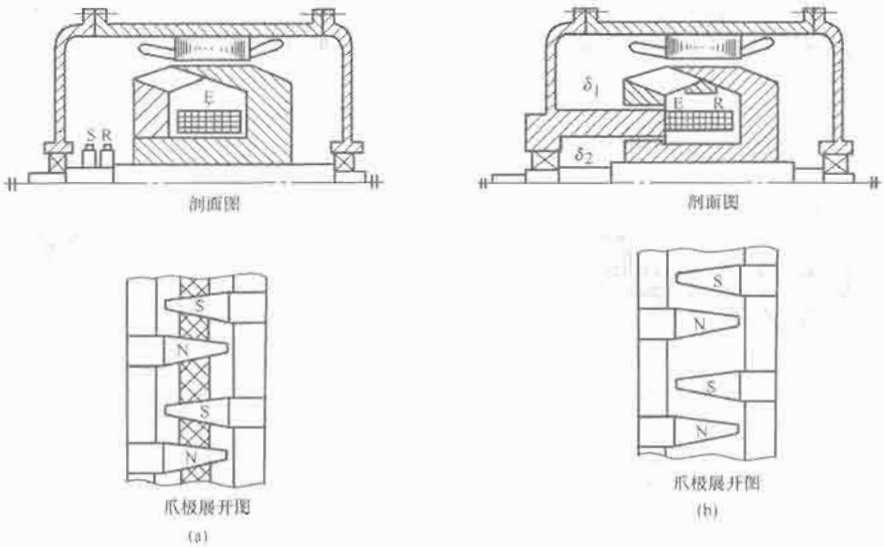


图2.7-1　爪极发电机的结构图

（a）无刷结构；（b）有刷结构

N—N极性爪极；S—S极性爪极；E—励磁绕组；SR—励磁用集电环；R—无磁性环；δ_1、δ_2—附加气隙

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

1.2.2 分类及适用范围

感应子发电机有多种型式。

1）根据定、转子齿距或齿数之间的关系可以分为：

① 倍齿距式（或称古典式、罗伦兹-施米特式）。转子齿距等于定子齿距的整数倍，其适宜的频率范围为：单相4000Hz及以下，三相2000Hz及以下。

② 等齿距式（或称梳齿式、盖氏式）。转子齿距等于定子齿距，其适宜的频率范围为：单相4000～10000Hz，三相2000Hz以上。

2）按磁路结构的不同可以分为：

①同极式（或称单极式、轴向磁通式）。只有一个环形励磁线圈，线圈轴线与转子轴线相重合，如图2.7-2和图2.7-3所示。

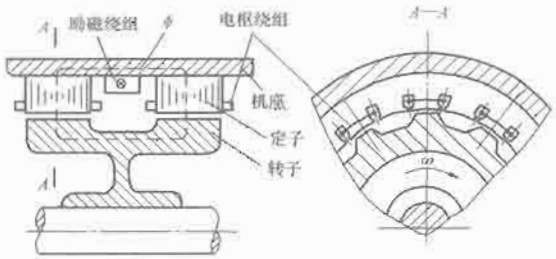


图2.7-2 同极双铁心式结构

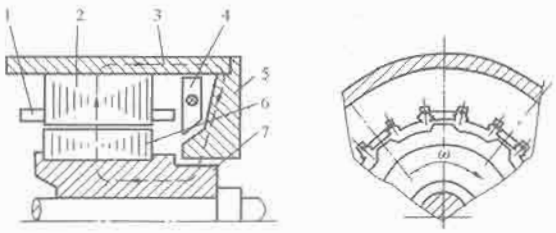


图2.7-3 同极单铁心式结构

1—电枢绕组；2—定子铁心；3—机座；4—励磁绕组；5—导磁端盖；6—转子铁心；7—转子支架

同极式结构沿整个定子内圆的磁场极性是同名的，转子可用锻钢制成。由于磁路长，剩磁电压高，时间常数大，给调节、控制都带来不便。

② 异极式（或称多极式、径向磁通式）。有几个（成对的）励磁线圈，它们的轴线与转子的轴线相垂直，如图2.7-4所示。

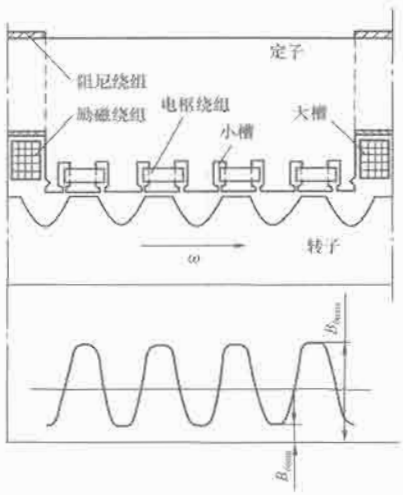


图2.7-4 异极倍齿距单相感应子中频发电机结构原理

异极式能克服同极式的缺点，但转子要用硅钢片叠成，故圆周速度一般不超过100m/s，而且定子内圆有8%～25%的空间被励磁绕组占去，降低了利用率。转子在极性交替的磁场中旋转，产生较大的铁损耗。

1.2.3 异极倍齿距感应子发电机工作原理

1）中频电动势。异极倍齿距发电机可做成单相或多相。图2.7-4为单相结构原理图。转子外圆上只有一种槽，均匀分布。定子上冲有两种槽，即大槽和小槽。

大槽通常为四个或六个，沿圆周均匀分布。大槽内嵌放励磁绕组，通入直流电后，在定子内腔形成四个或六个极性交替的磁场。每两个大槽间均匀分布着若干个小槽，在其中嵌放中频绕组。图2.7-4示出了气隙磁通密度的分布。气隙磁通可分解为恒定分量和交变分量，其中交变分量的周期相当于一个转子齿距。交变分量在中频绕组内所感生的电动势频率为

$$f=\frac{t_r n}{60}\quad(\mathrm{Hz}) \tag{2.7-1}$$

式中，t_r为转子齿数；n为转子转速，r/min。

中频绕组中的感应电动势（每相）有效值为

$$E=4f_B f N_\Phi \Phi_\sim K_{sk}\quad(\mathrm{V})$$

$$N_\Phi=\frac{N_{c\Phi}N_c}{a} \tag{2.7-2}$$

$$\Phi_\sim=\frac{1}{2}(\Phi_{max}-\Phi_{min})$$

式中，N_Φ为中频绕组每相串联匝数；$N_{c\Phi}$为磁场波形因数；N_c为中频绕组每相串联匝数；$\Phi_\sim$为与每个中频绕组铰链的交变磁通，Wb；Φ_{max}为转子齿中心线与中频绕组轴线（或相应的定子齿中心线）对齐时，与中频绕组交链的磁通，Wb；Φ_{min}为转子槽中心线与中频绕组轴线（或相应的定子齿中心线）对齐时，与中频绕组铰链的磁通，Wb；K_{sk}为考虑斜槽或铁心轴向分段错开以及铁心叠压不整齐等对感应电动势影响的系数。

2）中频绕组的构成。倍齿距感应子发电机中频绕组的构成原理与一般同步发电机的相同，即属于同一相的各绕组元件串联时，应使其感生的电动势相加。由于每一励磁极距内有整数个转子齿距，相邻磁极下处于相似位置的元件中的感应电动势相位差180°，因此，串联时应互相反接。在倍齿距感应子发电机中，每一个转子齿距范围内有K_z个定子齿距，K_z取值不同时可以构成型式不同的绕组，如图2.7-5所示。图2.7-6为$K_z=2$时单相绕组展开图，图2.7-7为$K_z=6$时三相绕组展开图。

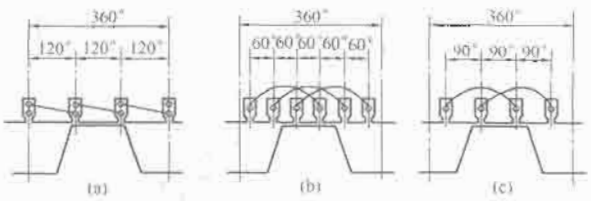


图2.7-5 K_z不同的多相发电机

1.2.4 异极等齿距感应子发电机工作原理

它也可制成单相或三相，其接线方式与倍齿距的基本相同。这里仅介绍单相等齿距发电机的工作原理。图2.7-8是这种电机的结构原理图。转子部分与倍齿距的完全一样，定子上则有大、中、小三种槽，大槽中嵌放励磁绕组，两个大槽之间均匀分布着4～8个中槽，其中嵌放中频绕组，中槽之间的大齿上有数个小齿，小齿的齿距与转子齿距相等。

当定子大齿1上的小齿与转子齿相对齐时，其相邻的大

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

齿 2 上的小齿正好与转子上的槽相对，当转子以恒定转速旋转时，被线圈 A 包围的大齿 2 中的磁通产生脉振，时而为 $t_0\Phi_{max}$（t_0 为每个大齿上的小齿数），时而为 $t_0\Phi_{min}$。如果大齿 2 中磁通随时间作正弦变化，则在线圈 A 中将感应正弦电动势，其频率与式（2.7-1）给出的一样。

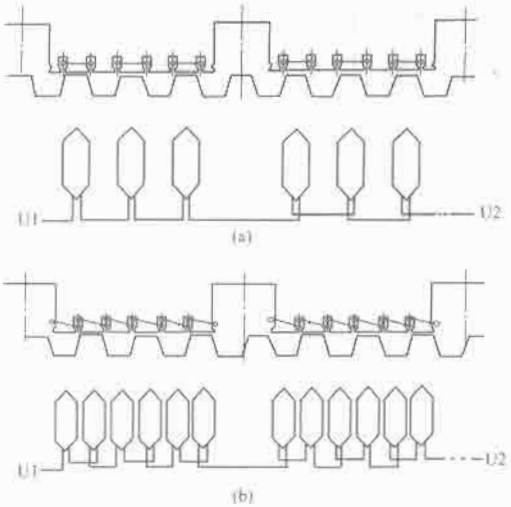


图 2.7-6　单相倍齿距感应子发电机电枢绕组的构成
（a）单层绕组；（b）双层绕组

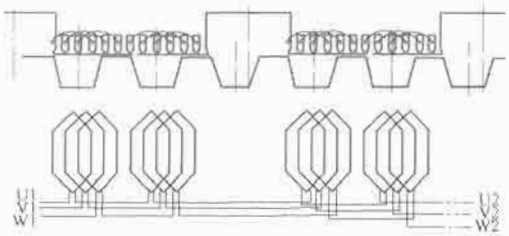


图 2.7-7　$K_z=6$ 的三相发电机电枢绕组的构成

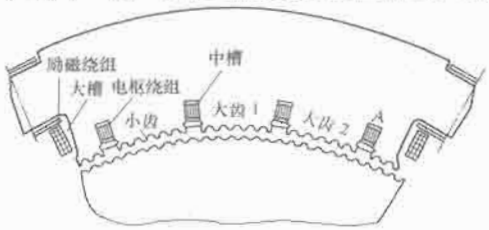


图 2.7-8　并极等齿距感应子发电机

1.2.5　变频机

中频发电机一般由交流或直流电动机驱动，并与电动机制成同轴同机座，这种机组称为变频机，安装型式有卧式的，也有立式的。

2　永磁同步电机

见本卷第 5 篇第 4 章、第 5 章。

3　交流励磁发电机

由于近年来水火电大量采用机端变自励的静止励磁系统，所以交流励磁发电机的生产数量大为缩减。

交流励磁发电机是交流励磁的供电电源。按其结构不同，它可分为旋转磁场结构和旋转电枢结构两种。前者用于静止整流器励磁系统，后者用于无刷励磁系统。

交流励磁发电机的励磁电流一般由永磁发电机（副励磁机）供给。与交流励磁发电机连接的整流器通常采用三相桥式电路。

交流励磁发电机的设计除应满足一般电机的要求外，还需满足电力系统稳定性计算提出的强励要求，如励磁顶值电压倍数、电压响应比等。因此，交流励磁发电机的特性对励磁系统总体的性能有很大影响。图 2.7-9 为交流励磁发电机特性曲线的一例。

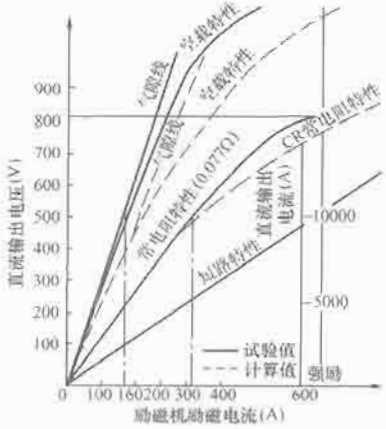


图 2.7-9　交流励磁发电机特性曲线

交流励磁发电机的电磁设计有以下特点：

1）为提高响应比，交流励磁发电机励磁绕组的时间常数应尽量小。为此，频率一般采用 100～200Hz。

2）为保证所需的顶值电压倍数，励磁发电机磁路很不饱和，B_δ 为 0.4T 左右。

3）由于电枢电感 L 的存在，电流不可能从一相瞬时地换到另一相，因而形成重叠角。在换相时，交流励磁发电机处于两相短路状态。为减小换相电压降，重叠角应在 30°～40°范围内，换向电抗 $X_k\approx0.2$ 左右。

4）交流励磁发电机带整流负载，其电枢电压、电流中含有较多的高次谐波分量，设计时应采取措施加以抑制，如增加定子槽数和气隙长度等。

二极管的发热时间常数很小，强励持续时间为 10s。对二极管而言，设计工况即是强励工况，静止整流器有 100% 的备用。旋转整流器有 25% 的备用，即 25% 管子损坏时仍能满足强励要求。强励时每个二极管的电流 I_D 不得超过额定值，其值可按下式计算

$$I_D=\frac{K_F K_D I_f}{3na}$$

式中，K_F 为强励倍数；K_D 为二极管间电流不均匀系数，约为 1.2；a 为每桥臂并联支路数；n 为每支路中并联的二极管数。

旋转磁场型交流励磁发电机的基本结构与小型汽轮发电机的相同，而无刷励磁机的基本结构则是旋转电枢式的，其电枢铁心由硅钢片冲制叠压成后，热套在轴上。整流环既是机械部件也是电气部件，其上装有二极管、电阻、电容器、熔断器等元器件，整流环与轴之间有电气绝缘。旋转元件应能承受离心力的作用。

图 2.7-10 为无刷励磁机结构示例。

交流励磁发电机的额定线电压和线电流值可按下式估算

$$I_{AC}\approx\frac{1.1I_f}{1.2}\approx0.917I_f$$

$$U_{AC}\approx\frac{1.1U_f}{1.2}\approx0.917U_f$$

式中，U_f 为发电机额定励磁电压；I_f 为发电机额定励磁电流。

上式中 1.1 为在电压、频率联合偏差范围内，发电机仍

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

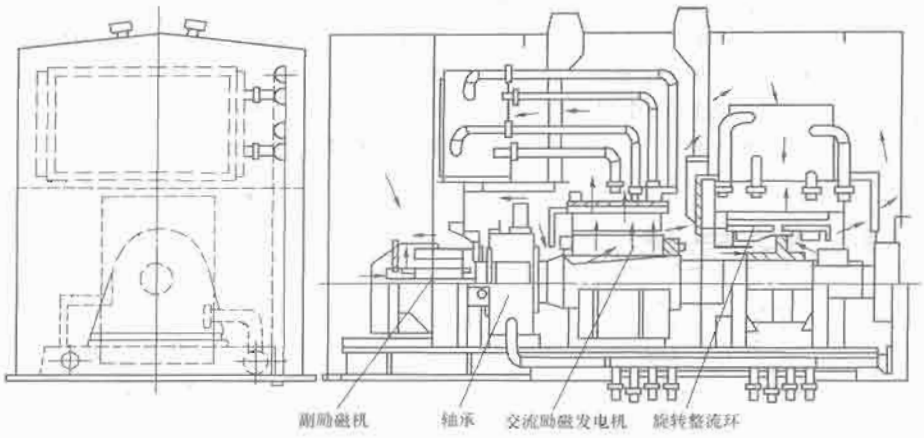


图 2.7-10 无刷励磁机总装图

发出额定容量需考虑的裕度；1.2 是发电机侧直流励磁电流与交流励磁机电枢侧的转换系数。

为了与自动电压调节器很好配合并使其能正常工作，设计副励磁机时应注意两点：

1）空载电压设计值与试验值之差应控制在 10%之内，并使电压调整率不超过 10%。

2）负载时，电压、电流波形畸变率应控制在允许的范围之内。

4 短路发电机

它是一种用于高压断路器断流容量试验及动、热稳定试验用的特殊发电机，安装在高压开关试验站内。该电机只能作为出口端突然短路工况（包括全相或非全相突然短路），不能作为发电机或调相机使用。以 DSF-100-2 短路发电机为例，它持续短路时间为 0.15s，两次突然短路之间最短的时间间隔为 0.2s，每四次短路为一个试验循环，每班可进行八个试验循环。在每个试验循环中，允许发电机空载带电 8min，两个试验循环之间要间隔 30min，在此期间内发电机应无励磁空转。短路发电机的容量是一种形式容量，它是指其锻件尺寸用作常规发电机时所对应的容量。如 DSF-100-2 就是指其转子锻件的尺寸与 100MW 氢外冷汽轮发电机的相近，电抗计算依此为标称值。短路发电机的短路容量 S_{SC} 指短路三个周期后被试开关端的实际可用容量，即

$$S_{SC}=\sqrt{3}U_N I_k \propto \frac{U_N^2}{X_d''+X_b}$$

式中，U_N 为发电机额定电压；X_d'' 为发电机初始瞬态电抗饱和值；X_b 为母线电抗；I_k 为短路三个周期后发电机短路电流有效值。

短路发电机可以制成两极结构，也可制成多极结构。前者用得较多，它具有尺寸较小、短路力矩也小等优点。

短路发电机电磁设计的特点如下：

1）要尽量降低发电机初始瞬态电抗 X_d' 饱和值才能保证短路容量。但是按具体结构要精确计算发电机 X_d'' 饱和值难度很大，必要时需要在模型上试验核实。减少定子槽数，采用浅而宽的定子槽型，定子绕组端部采用全铜屏蔽等都是降低 X_d'' 的有效措施。

2）短路三个周期后的短路电流衰减要慢。为此，转子要有较强的阻尼绕组并配以强励倍数较高的强行励磁。但是，要求强阻尼与要求高顶值的强励倍数相互间是有矛盾的，必须统筹考虑。

3）对定、转子电压，电流的瞬态过程要进行仔细计算，以掌握发电机的电气特性和机械特性。

短路发电机定子端部的结构如图 2.7-11 所示，其特点是：

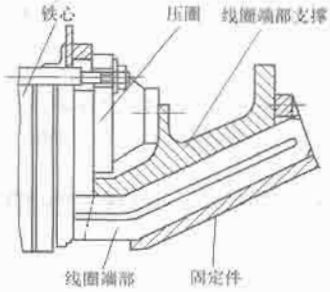


图 2.7-11 短路发电机定子端部结构

1）定子绕组端部、槽部突然短路时要承受巨大的冲击力，因此，定子绕组固定要采取特殊的结构、工艺措施，以防止线圈产生有害变形。定子绕组端部固定很特殊，如端部绕组全部黏牢，并固定在用黄铜铸成的内外锥形压圈间。定子绕组出槽口绝缘要加强，以确保短路发电机的使用寿命。

2）定、转子绕组和定子铁心为空气表面冷却。由于是瞬时工作，温升按不稳定状态计算。

3）提高定子主绝缘的力学性能，增加抗冲击次数。

发电机由电动机拖动，发电机有单独的轴承油系统和冷却器水系统，电动机有单独的起动装置。

短路发电机安装后调试过程较长，其主要原因是配合被试开关逐步调试短路容量。在选定的短路电流下，应测量主要零部件的应力和变形，如果被测值已达极限就应限制短路容量。

5 正弦波发电机

这种电机无论空载或负载，线电压波形正弦性畸变率都小于普通发电机的，且一般小于 2.5%。正弦波发电机主要用作试验电源。

一般对交流发电机电压波形的要求都是指发电机在空载条件下的。由于励磁绕组的单相回路和凸极电机气隙磁导的不均匀，使发电机在负载时，尤其是在不对称负载时，电枢反应产生高次谐波，致使电压波形产生较大的畸变。为了减小电枢反应所造成的电压波形畸变，正弦波发电机一般采用隐极转子，并设置对称多相励磁绕组。当励磁绕组为对称多相绕组时，不对称负载所产生的反向旋转磁场，在励磁回路中产生两倍定子频率的对称多相电流，并产生与转子磁极旋转方向相反的两倍转子转速（$-2n_r$）的磁场。该磁场在定

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

子绕组中只感生基波。不产生高次谐波电动势。若励磁为单相回路，则不对称负载在励磁回路中产生的磁动势为脉振的，可分解为沿正反两个方向旋转的两个磁动势，并产生相对于转子为$\pm 2n_s$的磁场。该磁场将在定子绕组中感生三次谐波。正弦波发电机励磁回路一般采用两相或三相绕组。两相时，一相励磁，一相短路，或两相均用于励磁。励磁绕组为三相时，两相串联励磁，另一相短路；或两相并联，再与另一相串联励磁。

正弦波发电机适用于对电压波形有严格要求的场合，作为测试电源较为普遍。随着测试技术的进步，除电压波形要求外，对发电机的转速、电压调节精度及稳定性也提出了更高的要求。

同步电机还可作为同步调相机（一种接在交流电网上，不带任何机械负载而空转的同步电动机），向电网输出电感性的或电容性的无功功率，以改善电网的电能品质。

综上可知，同步电机在国民经济中具有十分重要的地位和作用。

6 小功率同步电动机

小功率同步电动机参见本卷第5篇。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 8 章 同步电机励磁系统

1 概述

励磁系统通常包括励磁调节装置、励磁功率装置、灭磁装置及相关的信号和保护装置等设备。由励磁系统和同步电机构成的反馈控制系统被称为励磁控制系统（见图 2.8-1）。

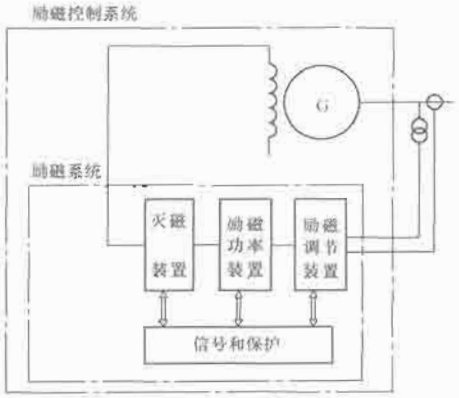


图 2.8-1 励磁控制系统框图

励磁系统术语请详见国标 GB/T 7409 和行业标准 DL/T 583。

1.1 常用励磁系统

随着时代的前进、技术的进步以及电网对励磁系统要求的不断提高，现代常用的励磁系统仅有静止励磁系统（见图 2.8-2）和交流励磁机励磁系统两种。交流励磁机励磁系统中，根据采用整流器型式的不同，又分为交流励磁机带静止整流器励磁系统（见图 2.8-3）和交流励磁机带旋转整流器励磁系统（见图 2.8-4）。

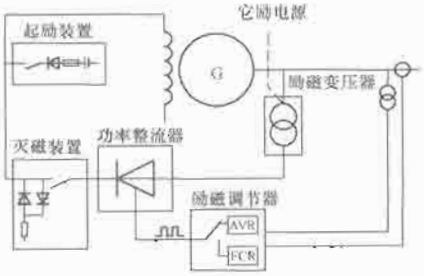


图 2.8-2 静止励磁系统原理框图

交流励磁机带静止整流器励磁系统和交流励磁机带旋转整流器励磁系统性能是完全等效的，不同的是两者的交流励磁机的结构，前者是旋转励磁型，而后者是旋转电枢型。对于后者，主励磁回路中由于励磁机的电枢、旋转整流器及同步电机的励磁绕组都是安装在转轴上以同步速度旋转，三者间是相对静止的，电气上为固定连接；在励磁机的励磁回路中，励磁机的励磁绕组安装在定子上，其与晶闸管整流器的电气连接也是固定的，因而该系统完全免去了电刷，俗称无刷励磁系统。

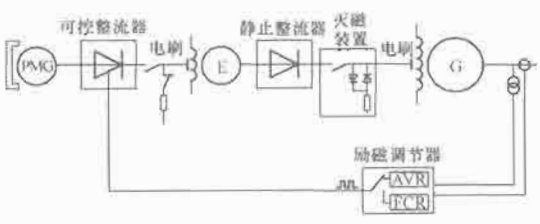


图 2.8-3 交流励磁机带静止整流器励磁系统原理框图

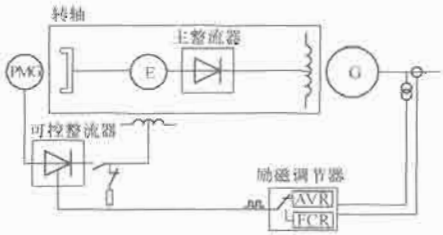


图 2.8-4 交流励磁机带旋转整流器励磁系统原理框图

交流励磁机励磁系统还有两种派生型，即用一个机端变压器代替永磁机（PMG），其应用也相当广泛（见图 2.8-5 和图 2.8-6）。

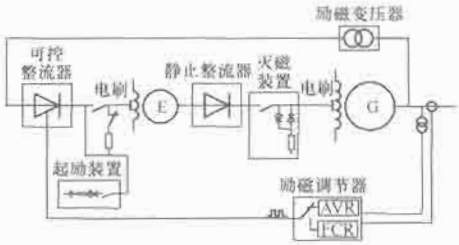


图 2.8-5 带机端变的交流励磁机励磁系统原理框图

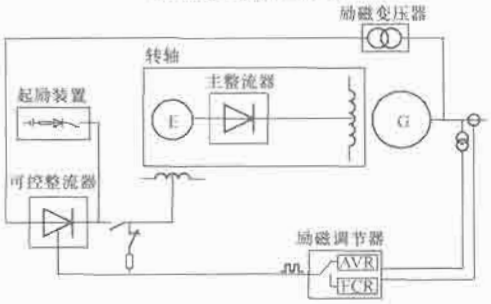


图 2.8-6 带机端变的无刷励磁系统原理框图

1.2 常用励磁系统的应用

静止励磁系统因其具有的诸多优点，几乎适用于所有型式的同步电机，除非有特殊条件的限制，静止励磁系统应为首选。常规同步发电机组励磁变压器的一次侧通常接在机端（简称为自并激系统），对于像抽水蓄能电站的发电/电动机组和由燃气轮机拖动的同步发电机，励磁变压器的一次侧则要接到其他电源上。

有刷的交流励磁机励磁系统目前在电网上大量运行，但该系统几乎不具备什么优点，其应用将会越来越少。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

无刷励磁系统尽管其性能与有刷的交流励磁机励磁系统完全等效，但它是一种真正的免维护的系统，特别适用于要求免维护的同步电机和高速、大容量的同步电机。

1.3　“高起始”的概念

静止励磁系统的电压响应时间正常为小于 0.05s，该系统被称为快速响应系统。交流励磁机励磁系统的电压响应时间远大于静止励磁系统的电压响应时间（取决于交流励磁机的时间常数）。为了使交流励磁机励磁系统的电压响应时间接近静止励磁系统的电压响应时间，以满足电网在过渡过程中对励磁系统快速性的要求，就要对系统进行特殊设计，即大幅度提高交流励磁机励磁回路的顶值电压倍数，使得交流励磁机的励磁电流的上升速度大大加快，从而大大提高系统的电压响应时间。这种经过特殊设计的、电压响应时间达到 0.1s 的交流励磁机励磁系统被称为“高起始”响应的励磁系统。

“高起始”响应的励磁系统在国外应用较少，在国内应用较多。

2　励磁调节器

励磁调节器是一个总称，通常包括自动电压调节器（AVR）和励磁电流调节器（FCR）和励磁电压调节器（FVR）。

现代励磁调节器都是数字式的，核心硬件是计算机，其组成如图 2.8-7 所示。AVR、FCR 或 FVR 是由工程师按照某种控制规律编写的软件安装在计算机里运行。计算机的硬件和软件共同构成了完整的励磁调节器。

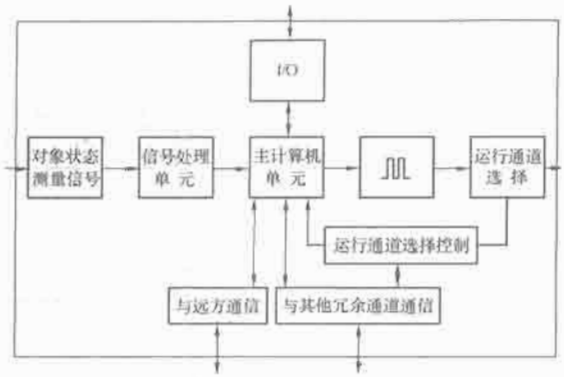


图 2.8-7　励磁调节器硬件示意图

2.1　自动电压调节器

自动电压调节器（AVR）是以同步发电机的端电压为控制对象的调节器，习惯上简称为“自动”调节器。其作用有三个：一是自动维持发电机电压的恒定；二是使电力系统的无功功率在并联运行的机组间进行合理分配；三是维持电力系统的稳定性。自动电压调节器的性能指标请详见国标 GB/T 7409 和行业标准 DL/T 583。

2.1.1　自动电压调节器数学模型

自动电压调节器的控制规律是用数学模型来描述的。调节器的全部功能都显示在数学模型中。IEEE Std 421.5 中给出了按照古典控制理论研究出来的多种型式的数学模型，供应商只是选用其中一种或者在其基础上略作修改用于产品中。自动电压调节器的软件应真实地实现数学模型所描述的功能。

采用现代控制理论的调节器在国内也有应用，其理论尚在发展中，未能形成标准。

下面引述三种较常应用的 IEEE 模型（见图 2.8-8～图 2.8-10）。

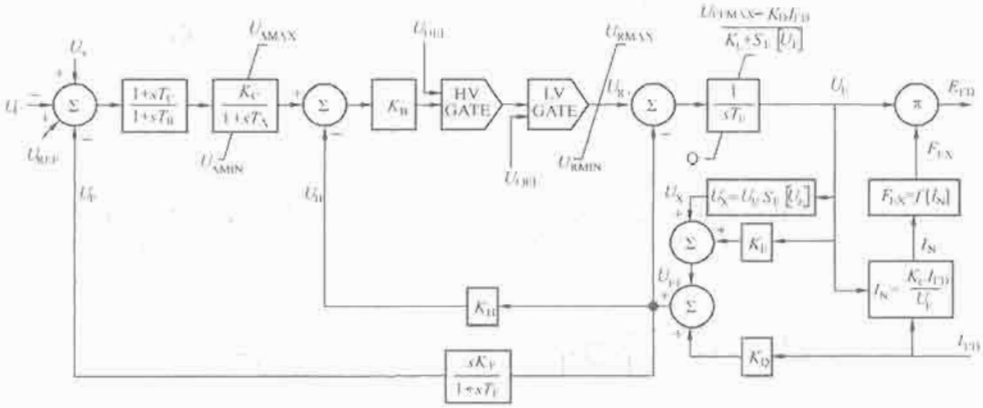


图 2.8-8　AC2A 型高起始无刷励磁系统数学模型

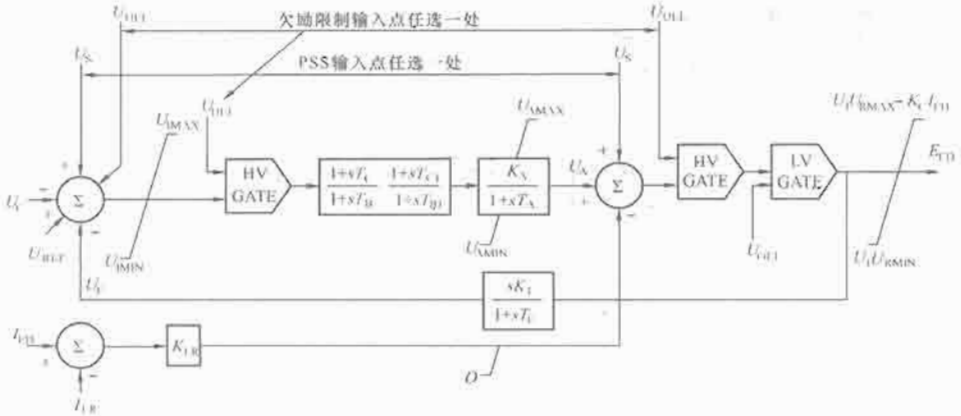


图 2.8-9　ST1A 型静止励磁系统数学模型

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

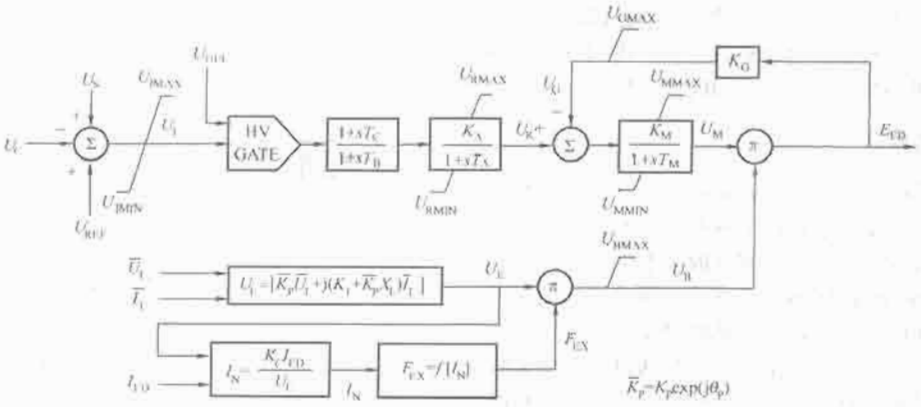


图 2.8-10 ST3A 型静止励磁系统数学模型（带磁场电压调节器）

2.1.2 冗余容错技术

数字式自动电压调节器广泛采用冗余容错技术以提高调节器的可靠性。冗余容错，就是通过采用硬件配置的多重冗余从而容许调节器局部出错而调节器整体仍能正常工作，从而提高调节器的整体可靠性。

冗余容错技术的典型应用有二通道冗余和三通道冗余两种，三通道冗余根据其采用的应用技术不同又分为三通道冗余表决容错系统（TMR）和三通道冗余混合容错系统。

二通道冗余（见图 2.8-11）中，通道被分为运行通道和备用通道，由运行通道完成规定的功能，备用通道作为热备用或冷备用。当运行通道失效时将被切除，备用通道转为运行。

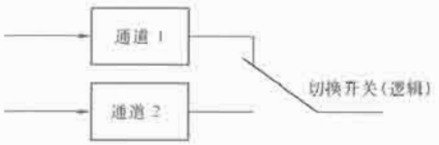


图 2.8-11 二通道冗余容错系统

三通道冗余表决容错系统（TMR）（见图 2.8-12）由三个并行的通道组成，每个通道有相同的功能结构，都具有独立完成系统功能的能力。它对错误处理的基本方法是按照少数服从多数的表决原则排除错误，它不规定当前哪个通道在运行。

三通道冗余混合容错系统（见图 2.8-13）中，每个通道都将另外两通道的信息作为参考，执行自检和互检，通道前级和通道后级可以交差运行从而模糊了“通道”的概念。它对错误的处理方法是使错误部分自动退出而不是切换，在运行方式上比 TMR 更灵活。

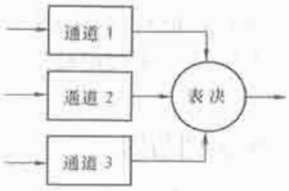


图 2.8-12 TMR 表决容错系统

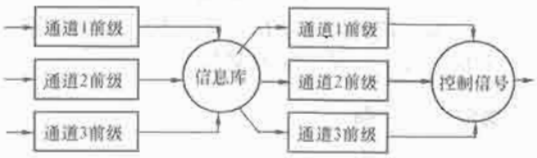


图 2.8-13 三通道冗余混合容错系统

2.1.3 电力系统稳定器（PSS）

PSS 是 AVR 重要的辅助功能之一，是用于帮助 AVR 解决电力系统稳定性问题的。当电力系统发生有功功率的低频振荡（振荡频率通常为 0.2～2Hz）时，PSS 检测到这种振荡并向 AVR 输出一个补偿信号改变发电机的励磁电流，且这种励磁电流的改变在转轴上产生的附加电磁转矩总是阻力矩，从而达到缩短振荡周期的目的。PSS 的数学模型在 IEEE Std 421.5 中有描述，此处引述两种比较符合中国要求的模型，如图 2.8-14 和图 2.8-15 所示。

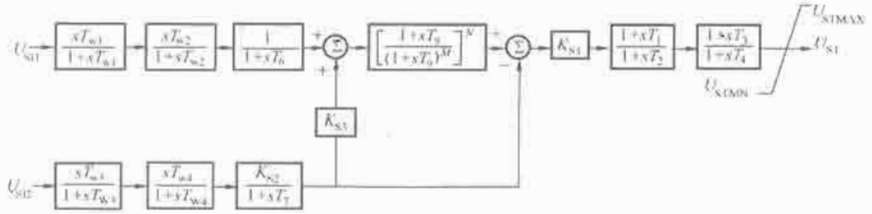


图 2.8-14 PSS2A 双输入电力系统稳定器

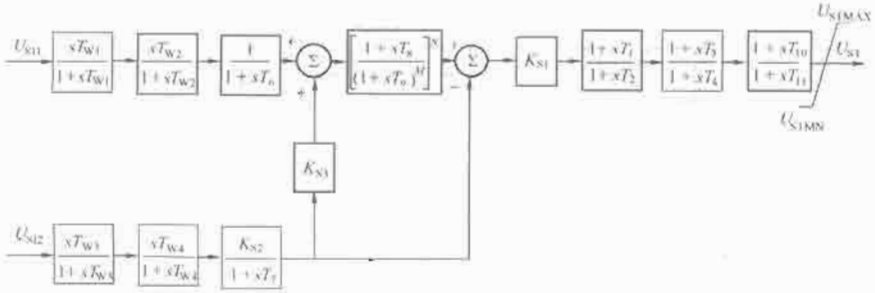


图 2.8-15 PSS2B-PSS2A 的改进型

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.2　“手动”调节器

FCR 是以同步电机的励磁电流为控制对象的调节器。

在同步发电机中，调节励磁的基本目的是要维持发电机电压的恒定，由于发电机的励磁电流与发电机电压之间存在着一种一一对应关系（发电机空载特性），所以 FCR 通过调节励磁电流可以起到间接调节发电机电压的目的。但是，这种对发电机电压的间接调节是不精确的，往往需要运行人员改变励磁电流的给定值才能使发电机电压为希望值，故 FCR 被定义成“手动”调节器。又由于 FCR 不具备 AVR 的三项功能，它只能用作 AVR 的备用。

对于同步电动机，调节励磁的基本目的是要维持电动机的转矩平衡，恒励磁电流调节就能满足这一目的，所以，FCR 是同步电动机的主要调节器。

3　励磁系统的功率装置

3.1　交流励磁机励磁系统的功率装置

交流励磁机励磁系统的功率装置由交流励磁机和不可控的整流器（静止或旋转的）组成（见图 2.8-3 和图 2.8-4）。交流励磁机是同步电机的励磁电源，整流器仅起交流变直流的作用。励磁系统电压的改变是由 AVR 改变交流励磁机的励磁电流来实现的，励磁系统的顶值电压对应交流励磁机所能输出的最大电压。所以，交流励磁机既是励磁电源又具有调压器的特性。

3.2　静止励磁系统的功率装置

静止励磁系统的功率装置由励磁变压器和晶闸管整流器组成（见图 2.8-2）。

3.2.1　励磁变压器

励磁变压器是用来传递励磁功率的，励磁电源是发电机本身（自并激系统）或其他电源。励磁变压器的作用有三个：一是为发电机提供全部运行工况所需要的励磁功率；二是根据励磁系统顶值电压的要求为晶闸管整流器提供合适的输入电压；三是将同步发电机转子回路与励磁电源进行电气隔离。

励磁变压器一般为户内使用，在选用时应以下两个因素：第一，不宜选择高绝缘等级变压器作励磁变压器，因为高绝缘等级变压器运行温度高，这会造成厂房内的温度污染；第二，宜尽可能选用环氧树脂绝缘的变压器。若选用其他型式的变压器作励磁变压器，机组在停运期间，绝缘材料因返潮其绝缘电阻会降低，尤其是水电站，再起机前，有时不得不对励磁变压器作长时间的烘烤，待绝缘电阻合格后才能投运。环氧树脂绝缘的变压器就避免了这一问题。

由于励磁变压器不是变压器典型应用，其容量是根据发电机励磁的负载特点先分别确定它的二次电压和二次电流后再考虑一些其他因素而确定，用公式表示为 $S=S_2+\Delta S$。其中 S_2 是励磁变压器二次绕组的计算容量，ΔS 包括变压器的铜损耗、铁损耗和此种应用中的波形畸变而产生的高次谐波在变压器中产生的附加损耗。实验测定高次谐波产生的附加损耗约相当于变压器额定容量的 15%，但这并不意味着要将变压器的总容量简单地增加 15%，而是要在设计变压器的时候对变压器的特殊部位作特殊考虑，控制变压器的温升不超标，变压器的实际容量并不是要增加 15%。这一点可由励磁变压器的供货商掌握。

励磁变压器的二次电压应保证晶闸管整流桥的直流输出电压的最大值等于励磁系统的顶值电压（晶闸管整流桥在最小控制角下输出最大电压，最小控制角由调节器供货商确定）。考虑换弧压降的影响后，$U_2\approx 0.825U_C$。励磁变压器的二次电流 I_2 应保证在最大连续电流下长期运行，国内通常要求为 1.1 倍的额定励磁电流。这样，励磁变压器二次绕组的计算容量 $S_2=\sqrt{3}U_2I_2$。

3.2.2　晶闸管整流器

晶闸管整流器的作用是完成交流变直流和实现调压。

为了保证励磁系统的可靠性，晶闸管整流器也采用冗余配置，常用的冗余模式是（$N+1$）。

三相晶闸管整流全桥在带电感负载时可以输出正的和负的电压（控制角 $0<\alpha<90°$ 时为正，$90°<\alpha<180°$ 为负），这一特性在静止励磁系统中可用作逆变灭磁。

4　同步电机灭磁

同步电机在停机之前必须先卸除施加在同步电机励磁绕组里的励磁电流，简称为灭磁，它是同步电机停机过程中的一个步骤。由于同步电机的励磁绕组是一个电感量巨大的电感，它具有维持其电流连续的强烈作用，所以卸除施加在同步电机励磁绕组里的励磁电流就不是一件容易的事，需要采取一定的辅助措施协助灭磁。当作辅助措施来用的设备被称为灭磁装置。

4.1　静止励磁系统的灭磁

静止励磁系统通常采用两种灭磁方式即逆变灭磁和灭磁装置灭磁。在静止励磁系统中，逆变灭磁只是励磁装置的一种工作状态，无需增加硬件设备，是一种既经济又可靠的灭磁方式，正常情况下只用逆变灭磁就足够了。静止励磁系统都另外配备了灭磁装置，在程序上被设计成只在某些紧急情况下才起动。

4.1.1　逆变灭磁

晶闸管整流桥工作在逆变状态时，励磁绕组中储存的能量向交流电源侧反馈，这时的励磁电流是由转子储能维持的，方向不变。随着转子储能的迅速消耗励磁电流也跟着迅速减少到零。

4.1.2　灭磁装置灭磁

现代常用灭磁装置为“移能”型，如图 2.8-16 所示。灭磁时，磁场断路器 FCB 将电源与励磁绕组隔离开，励磁绕组与放电电阻（也叫灭磁电阻）R 构成闭合回路，励磁电流转移到放电电阻 R 上，转子储能在放电电阻 R 上消耗掉而灭磁。

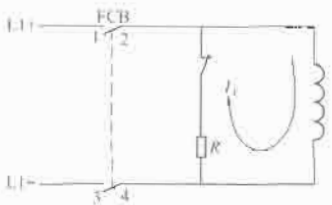


图 2.8-16　灭磁装置示意图

有三种放电电阻可供选择：线性电阻、碳化硅非线性电阻和氧化锌非线性电阻，它们的伏—安特性如图 2.8-17 所示。从图中可知，在同样的灭磁电流下，不同的放电电阻产生的电压是不一样的，氧化锌非线性电阻的电压最小，对转子绝缘的影响最小；线性电阻的电压最大，碳化硅非线性电阻居中。改变线性电阻的阻值可以改变其伏—安特性的斜率，这样若降低线性电阻的阻值，就可以减小电压，但灭磁

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

时间就会加长。

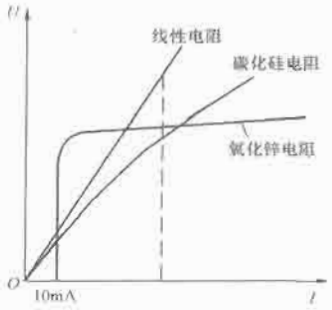


图 2.8-17 放电电阻的伏-安特性

采用线性电阻或碳化硅非线性电阻作为放电电阻时，是先投入放电电阻后断开磁场断路器，电流很容易就转移到放电电阻上，此种应用对磁场断路器要求不高。采用氧化锌非线性电阻作为放电电阻时，由于氧化锌非线性电阻有门槛电压要克服才能导通，需要先断开磁场断路器来产生一个高于氧化锌非线性电阻门槛值的电压迫使其导通，才能使电流成功地转移到放电电阻上，此种应用需要专用的磁场断路器。

4.2 交流励磁机励磁系统的灭磁

4.2.1 无刷励磁系统的灭磁

无刷励磁系统的励磁回路安装在同步电机的转轴上，是一个永久的闭合回路，这个回路中没有灭磁装置，因为无法将灭磁装置安装在转轴上。无刷励磁系统的灭磁是先将交流励磁机灭磁，交流励磁机的电枢失电压，同步电机的励磁绕组对交流励磁机的电枢绕组续流放电而灭磁。

4.2.2 交流励磁机带静止整流器励磁系统的灭磁

本系统完全可以采用和无刷励磁系统相同的灭磁方式，对机组没有任何危害。但由于本系统不存在安装方面的困难，通常还是将用于静止励磁系统中的灭磁装置安装在本系统中，以实现快速灭磁。

4.3 励磁回路的过电压保护

只有用晶闸管整流器供电的励磁回路才需要考虑过电压保护，且保护范围仅限于无源的浪涌过电压。过电压保护采用的是一种被称为“跨接器”的装置，如图 2.8-18 所示。所谓过电压保护即是，当励磁回路中有浪涌过电压产生，且其值超过过电压检测器的设定值时，过电压检测器向晶闸管发出触发脉冲，从而将电阻 R 接入为浪涌过电压提供一条放电的通路，浪涌过电压过去后将晶闸管关断。过电压保护动作值的确定以不超过同步电机励磁绕组出厂耐压试验值的 70%为原则。电阻 R 可以共用灭磁电阻，也可以单独设置。

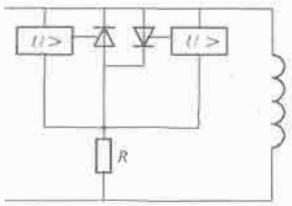


图 2.8-18 “跨接器”示意图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 9 章　异步化同步发电机

1　概述

前苏联称的异步化同步发电机（Asynchronized Synchronous Generator，ASG）与北美、欧洲称的双馈感应电机（Doubly—Fed Induction Machine，DFIM）及日本称的交流励磁电机（Aternating Current Excitation Machine，ACEM）无本质的差别，这些称谓只是从电机某方面的特征给这类电机不同的命名。这类电机的共同特点是定子具有三相对称绕组，转子有两相或三相对称绕组，经相应相数的变频电源供给励磁，虽然该类电机电气结构上类似于绕线转子异步电机，但从内部的电磁关系看，是一类特殊的同步电机。当然对于不同用途的该类电机有不同的设计与控制理念。

20 世纪 60 年代，前苏联研制了两台 50MVA 异步化水轮发电机，安装在依奥夫斯克水电站并投入电网正式运行，其中一台于 1972 年实现了变速恒频发电工业试运行，1977 年第二台也实现了变速恒频发电，两台异步化水轮发电机在电站实现了同频异步并列运行，且成功地实现了输出无功和大量吸入无功的稳定运行。200MW 异步化汽轮发电机试验样机由哈尔科夫重型电机厂、全苏电科院、乌克兰 SSR 科学院研制成功，并于 1985 年在 LVOV 能源管理局的布尔斯汀电站投入运行，同期 400kW 异步化潮汐发电机也投入了工业运行。20 世纪 90 年代前苏联已开始非正交两相励磁绕组的 800MW 异步化汽轮发电机的研制工作。

从 20 世纪 80 年代开始，日本日立、东芝公司开始研制转子对称三相励磁绕组的交流励磁发电机。1987 年初日立公司研制了 22MVA 的交流励磁电动发电机，于同年 4 月投入商业运行。1990 年东芝公司研制了容量为 85MVA 的抽水蓄能机组在 Yagisawa 电站投入运行。1993 年日立公司研制的 395MVA 抽水蓄能机组在 Ohkawachi 电站投入运行。

与此同时，西欧、北美一些国家的学者在 IEE 和 IEEE 等杂志上发表了大量研究双馈感应电机及其控制的文章，近年来兆瓦级双馈感应风力发电机和大容量抽水蓄能机组已得到了成功的应用。国内该领域研究起步较晚，20 世纪 90 年代初一些高等院校及研究单位对该类电机及其控制进行了研究，发表了一批研究文章及建立了小型的实验室试验装置，至今还未建成水、火电商业运行电站。

现有的理论研究成果及国外应用的实践表明：异步化同步发电机由于与传统的发电机有不同的转子励磁绕组结构及不同的励磁控制策略，使其具有传统同步发电机无法相比的优点：有功、无功及转速（交流励磁时）可以独立调节；大量吸无功运行时电机不会失去稳定；交流励磁时可实现变速恒频发电。因此该类电机对水电站前期发电（无需更换水轮机转轮）、水电站调峰运行、变速抽水蓄能站、风力发电系统、潮汐发电等均有很重要的应用价值。发电机转速与电网频率的解耦特性，对提高发电机与电力系统的稳定性有极重要的意义。异步化同步发电机大量吸无功而不失去稳定，是电站和电力系统抑制持续工频过电压的重要手段，有重要的技术经济价值。此外，交流励磁异步化电动机用于交流传动系统，比传统的变频调速系统有更良好的技术性能指标。因此，可以预料异步化同步电机在我国的电力工业及交流电气传动系统中有极为广阔的应用前景。

2　异步化汽轮发电机数学模型及控制原理

2.1　电气结构

2.1.1　电机本体的电气结构

异步化汽轮发电机与传统的同步汽轮发电机一样由交流发电机本体、励磁系统及励磁调节器组成。异步化汽轮发电机的定子三相绕组与传统同步发电机的相同，由对称三相绕组构成。异步化汽轮发电机与传统同步发电机本体电气结构的差异在于其转子有不少于两个励磁绕组，按转子励磁绕组轴线间的夹角不同，可分为以下两类：

1）转子对称两相励磁绕组，绕组轴线在转子表面上呈 90°机械角度，轴上安放有 4 个集电环用以引入转子对称两相励磁绕组的励磁电流，两相励磁绕组由两台可逆晶闸管装置供电。这种转子绕组分布的异步化汽轮发电机可长期以同步转速稳定运行，从原理上讲，也可带一定的较差率长期稳定运行。1985 年前苏联投运的 200MW 异步化汽轮发电机就采用这种转子绕组结构。

2）转子采用轴线在转子表面呈 60°机械角度的匝数相等的两相绕组，采用这种转子绕组结构的目的是为了在更大容量（例如 800MW）异步化汽轮发电机设计时，提高相同安匝下的转子有效励磁磁动势。通常这种结构的异步化汽轮发电机只能在同步转速下运行，且降低了发电机运行的灵活性。

2.1.2　励磁系统结构

1）励磁主回路。正交两相励磁绕组的励磁主回路如图 2.9-1 所示。

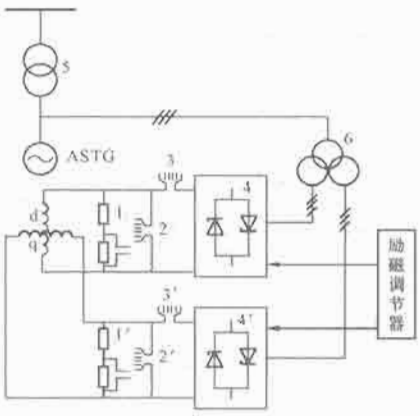


图 2.9-1　异步化汽轮发电机自励磁方式的励磁系统结构简图

图 2.9-1 中，“5”为发电机升压变压器；“6”为励磁变压器；d、q 为转子正交对称两相励磁绕组；“1”、“2”、“3”及“1′”、“2′”、“3′”分别为 d、q 励磁绕组过电压保护、励磁绕组短接及自动灭磁等装置；“4”及“4′”分别为 d、q 绕组独立的可逆晶闸管励磁装置，每个可逆晶闸管励磁装置

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

由两个三相桥整流器组成，当发电机在同步转速下稳态运行时，由两个桥式整流器之一形成相应的励磁绕组上的工作电压，获得稳定的直流励磁电流，此时，另一个整流器退出工作，或去掉控制脉冲，或将其转到逆变方式，这个退出工作的整流器仅在动态时才投入工作。"4"和"4′"可看成带有直接反馈的三相到两相的频率变换器，因此，从原理上讲异步化汽轮发电机也可实现变速恒频运行。

2）自动励磁调节器。异步化汽轮发电机自动励磁调节器必需实现转子励磁磁动势位置的最佳空间定位控制，自动励磁调节器原理框图如图 2.9-2 所示。

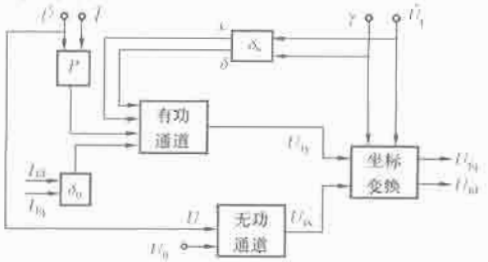


图 2.9-2 异步化汽轮发电机自动励磁调节器原理框图

图 2.9-2 中 P 为发电机当前输出的有功功率；δ_0 为稳态运行时（即 $I_{fd}=I_{fq}$ 时）的转子位置角；δ 为动态过程中的转子位置角；s 为动态过程中的转差率；$\dot{U}$、$\dot{I}$ 为发电机端电压及输出电流相量；U_0 为发电机机端电压给定值；$\dot{U}_1$ 为母线电压相量；γ 为转子两相合成磁动势与 q 轴励磁绕组轴线的夹角；U_{fy}、U_{fx} 分别为 d、q 双轴励磁电压在同步旋转轴系上的分量；U_{fd}、U_{fq} 为发电机实际 d、q 轴绕组的励磁电压。

图 2.9-2 中的有功通道，通过有功 P、转差 s、转子位置角 δ 以及 $I_{fd}-I_{fq}$ 反馈，实现发电机有功控制。无功通道，通过发电机机端电压（或无功）设定与发电机机端电压比较，实现发电机电压或无功控制。

3）异步化汽轮发电机在电站的接线方式。图 2.9-3 给出了自励方式的异步化汽轮发电机电站的原理接线图，图 2.9-3 中，T 为原动机；p 为角位置检测装置。其余符号前面已有说明。

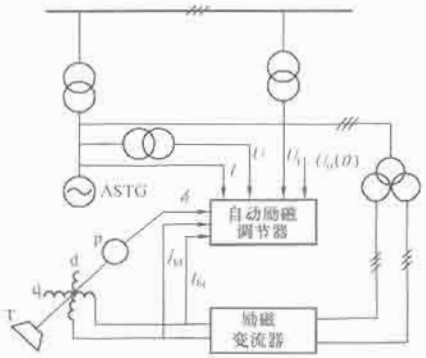


图 2.9-3 异步化汽轮发电机在电站接线的原理图

2.2 数学模型

2.2.1 稳态等效电路及相量图

异步化汽轮发电机稳态运行等效电路如图 2.9-4 所示。图中，$\dot{E}_f$ 为两相合成励磁磁动势产生的定子电动势；X_{af} 为定、转子绕组间的互感抗；R 为定子绕组电阻；X_σ 为定子绕组的漏抗；$\dot{U}$ 为发电机端电压；$\dot{I}$ 为发电机定子电流。

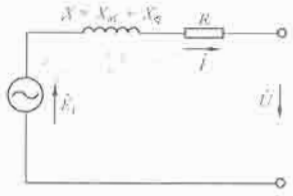


图 2.9-4 异步化汽轮发电机稳态等效电路

按图 2.9-4 写出异步化汽轮发电机电压方程

$$-\dot{U}=\dot{I}R+\mathrm{j}\dot{I}X-\dot{E}_f \qquad (2.9\text{-}1)$$

式中 $\dot{E}_f=-\mathrm{j}\dot{I}_f X_{af}$

忽略定子电阻 R 的稳态相量图表示在图 2.9-5 上。

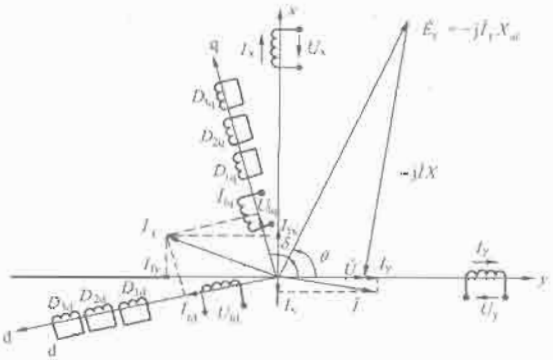


图 2.9-5 异步化汽轮发电机一空相量图

2.2.2 同步坐标轴系下的数学模型

将异步化汽轮发电机定子三相绕组变换到同步旋转的 x、y 轴系下，并取 A 相绕组轴线与同步旋转轴系的 y 轴重合，即初相位为零，且定子三相电压为

$$u_A=\sqrt{2}U\cos\omega t$$

$$u_B=\sqrt{2}U\cos(\omega t-120^\circ)$$

$$u_C=\sqrt{2}U\cos(\omega t+120^\circ)$$

图 2.9-5 表示了异步化汽轮发电机一空相量图。

图 2.9-5 中，U_{fd}、U_{fq} 为加在转子 d、q 绕组上的励磁电压；U_y、U_x 为同步轴系上定子两相绕组上的电压，按上述同步轴系与三相轴系的关系及定子三相电压的定义，此时应有 $U_y=U$ 及 $U_x=0$；θ 为发电机功率角；δ 为转子位置角，即同步轴系 y 轴与转子 q 轴的夹角；D_{3d}、D_{2d}、D_{1d} 及 D_{3q}、D_{2q}、D_{1q} 表示异步化汽轮发电机转子齿顶、齿身、齿根处相应的 d、q 阻尼绕组；$\dot{I}_f$ 为 d、q 绕组合成励磁磁动势的空间相量。稳态运行时 $I_{fd}=I_{fq}$。

按超同步转速为正定义转差率 s，即

$$s=\frac{\omega-\omega_0}{\omega_0}$$

式中，ω_0 为转子同步旋转角频率；ω 为转子实际旋转角频率。

按图 2.9-5 所示，可写出在同步轴系下的异步化汽轮发电机数学模型。

定子电压方程为

$$U_y=U=(R+pX)I_y+pX_{af}I_{fy}+pX_{af}I_{D1y}+\cdots+pX_{af}I_{Dny}-(XI_x+X_{af}I_{fx}+X_{af}I_{D1x}+\cdots+X_{af}I_{Dnx}) \qquad (2.9\text{-}2)$$

$$U_x=0=(R+pX)I_x+pX_{af}I_{fx}+pX_{af}I_{D1x}+\cdots$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$pX_{af}I_{Dnx}+(XI_y+X_{ay}I_{fy}+X_{af}I_{D1y}+\cdots+X_{af}I_{Dny})$$

励磁绕组电压方程为

$$U_{fy}=pX_{af}I_y+(R_f+pX_f)I_{fy}+pX_{af}I_{D1y}+\cdots+pX_{af}I_{Dny}+s(X_{af}I_x+X_fI_{fx}+X_{af}I_{D1x}+\cdots+X_{af}I_{Dnx}) \quad (2.9\text{-}3)$$

$$U_{fx}=pX_{af}I_x+(R_f+pX_f)I_{fx}+pX_{af}I_{D1x}+\cdots+pX_{af}I_{Dnx}-s(X_{af}I_y+X_fI_{fy}+X_{af}I_{D1y}+\cdots+X_{af}I_{Dny})$$

第 1 对等效阻尼绕组电压方程为

$$U_{D1y}=0=pX_{af}I_y+pX_{af}I_{fy}+(R_{D1}+pX_{D1})I_{D1y}+\cdots+pX_{af}I_{Dny}+s(X_{af}I_x+X_{af}I_{fx}+X_{D1}I_{D1x}+\cdots+X_{af}I_{Dnx}) \quad (2.9\text{-}4)$$

$$U_{D1x}=0=pX_{af}I_x+pX_{af}I_{fx}+(R_{D1}+pX_{D1})I_{D1x}+\cdots+pX_{af}I_{Dnx}-s(X_{af}I_y+X_{af}I_{fy}+X_{D1}I_{D1y}+\cdots+X_{af}I_{Dny})$$

第 n 对等效阻尼绕阻电压方程为

$$U_{Dny}=0=pX_{af}I_y+pX_{af}I_{fy}+pX_{af}I_{D1y}+\cdots+(R_{Dn}+pX_{Dn})I_{Dny}+s(X_{af}I_x+X_{af}I_{fx}+X_{D1}I_{D1x}+\cdots+X_{Dn}I_{Dnx}) \quad (2.9\text{-}5)$$

$$U_{Dnx}=0=pX_{af}I_x+pX_{af}I_{fx}+pX_{af}I_{D1x}+\cdots+(R_{Dn}+pX_{Dn})I_{Dnx}-s(X_{af}I_y+X_{af}I_{fy}+X_{D1}I_{D1y}+\cdots+X_{Dn}I_{Dny})$$

转子运动方程为

$$Jps=T_m-T_e \quad (2.9\text{-}6)$$

式中，$X=X_{af}+X_a$ 定子回路全电抗；$X_f=X_{af}+X_{fa}$ 励磁绕组全电抗；$X_{Dn}=X_{af}+X_{Da}$ 第 n 个阻尼回路全电抗；R、R_f、R_D 定子、励磁绕组和阻尼绕组电阻；U 发电机端电压；$I_{y(x)}$、$I_{fy(x)}$、$I_{Dny(x)}$ 定子、励磁和阻尼绕组电流在同步坐标 $y(x)$ 轴上的投影；J 发电机旋转部分的惯性常数；T_m 原动机输入转矩；T_e 发电机电磁转矩；$p=\mathrm{d}/\mathrm{d}t$ 算子。

2.3　控制原理

异步化汽轮发电机的控制原理可基于其忽略定子绕组电阻的稳态电压方程得出，令 $R=0$ 后式（2.9-1）可写成

$$-\dot{U}=\mathrm{j}(X\dot{I}+X_{af}\dot{I}_f) \quad (2.9\text{-}7)$$

将式（2.9-7）在同步坐标轴 x、y 上投影，得

$$\begin{aligned}-\dot{U}&=\mathrm{j}[X(I_y+\mathrm{j}I_x)+X_{af}(I_{fy}+\mathrm{j}I_{fx})]\\&=\mathrm{j}XI_y+\mathrm{j}^2XI_x+\mathrm{j}X_{af}I_{fy}+\mathrm{j}^2X_{af}I_{fx}\\&=\mathrm{j}XI_y-XI_x+\mathrm{j}X_{af}I_{fy}-X_{af}I_{fx}\end{aligned} \quad (2.9\text{-}8)$$

由于

$$-\dot{U}=-(U_y+\mathrm{j}U_x) \quad (2.9\text{-}9)$$

式（2.9-8）与式（2.9-9）实部、虚部分别相等，则

$$\begin{aligned}U_y&=U=XI_x+X_{af}I_{fx}\\-U_x&=0=XI_y+X_{af}I_{fy}\end{aligned} \quad (2.9\text{-}10)$$

由图 2.9-5 可知，发电机输出的有功功率可表示为

$$P=UI_y \quad (2.9\text{-}11)$$

输出无功功率可表示为

$$Q=-UI_x \quad (2.9\text{-}12)$$

于是将式（2.9-10）代入式（2.9-11）和式（2.9-12）可得有功、无功的表达式如下

$$P=-\frac{UX_{af}I_{fy}}{X}\quad Q=-\frac{UX_{af}I_{fx}}{X}-\frac{U^2}{X} \quad (2.9\text{-}13)$$

由式（2.9-13）可以看出，通过控制合成励磁电流在同步坐标轴系上的 y 轴分量（I_{fy}）就可独立控制发电机的有功功率，同样控制合成励磁电流在同步坐标轴系上的 x 轴分量（I_{fx}）就能独立控制发电机的无功功率。上述关系对传统的同步发电机同样是正确的，但是对传统同步发电机而言，因为单轴的励磁绕组只能改变励磁磁动势的大小，而不能改变磁动势的空间位置，因此，当励磁磁动势大小改变时，其在同步轴系 y、x 轴上的投影 I_{fy} 和 I_{fx} 将会同时发生改变，致使 I_{fy} 和 I_{fx} 不能独立控制。然而，异步化汽轮发电机转子励磁磁动势由对称两相绕组中的电流产生，因此，它不仅大小可以调节，同时其空间位置可通过不同轴中绕组电流大小的改变加以调节，由于增加了励磁磁动势空间位置可调的自由度，从而可对发电机有功、无功进行独立控制。

由图 2.9-5 可以看出：$\dot{I}_{f(qd)}=\dot{I}_{f(yx)}e^{j\delta}=(I_{fy}+\mathrm{j}I_{fx})(\cos\delta+\mathrm{j}\sin\delta)$，从而可得 q、d 轴与 y、x 轴上电流的关系为

$$\begin{bmatrix}I_{fq}\\I_{fd}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\delta & -\sin\delta\\ \sin\delta & \cos\delta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_{fy}\\I_{fx}\end{bmatrix}$$

当可逆晶闸管励磁装置由整流状态转到逆变方式稳态运行时，异步化汽轮发电机可处于 $s\neq0$ 稳态运行，s 的大小受转子实心体发热的限制，一般 s 小于或等于 1.5%。此时，转子由极低频率（sf_1）的交流电励磁由式（2.9-3），令 $p=0$，并忽略阻尼绕组作用时，可得同步旋转轴下转子电流电压关系如

$$\begin{aligned}I_{fy}&=[U_{fy}-s(X_{af}I_x+X_fI_{fx})]/R_f\\I_{fx}&=[U_{fx}+s(X_{af}I_y+X_fI_{fy})]/R_f\end{aligned} \quad (2.9\text{-}14)$$

式（2.9-14）表明，异步化汽轮发电机仅在转子以同步速度旋转即 $s=0$ 时，同步轴系下的励磁电流才正比于相应轴系下的励磁电压。当 $s\neq0$ 时，出现了同步轴系的交叉耦合，此时控制转子电流在 $y(x)$ 轴上的投影，必然对 $x(y)$ 轴上的投影产生影响，因此不能像 $s=0$ 运行时，实现有功、无功的独立控制。为消除这种交叉耦合可通过引入 U_{fy} 和 U_{fx} 的电压控制，以相应电流构成硬性负反馈分量来抑制，或在控制电压上附加大小相等方向相反的额外分量来补偿，或采用其他的控制策略实现解耦控制。对于异步化汽轮发电机，由于 $s\neq0$ 稳态运行的极限 s 极小（受限于实心转子的发热），要求转速检测精度很高（达 10^{-4}）。由于以上两个原因，增加了实现异步化汽轮发电机 $s\neq0$ 稳态运行的技术难度及投资。因此，当前的异步化汽轮发电机仅研究和实施 $s=0$ 稳态运行控制。

至于异步化汽轮发电机在动态和暂态过程中，同步轴系下的量的交叉耦合是必然存在的，这在控制器的设计中是必须考虑的。

3　异步化汽轮发电机的运行特性

3.1　双通道励磁控制

图 2.9-2 给出了异步化汽轮发电机双通道励磁控制器的框图。从式（2.9-13）可以看出：控制合成励磁电流 $\dot{I}_f$ 在 y 轴上的投影 I_{fy}（U_{fy}），可以控制发电机输出的有功功率；控制合成励磁电流 $\dot{I}_f$ 在 x 轴上的投影 $I_{fx}(U_{fx})$，可以控制发电机输出的无功功率。

图 2.9-2 中，有功通道的主要功能是控制与发电机有功相关的物理量，保证发电机转子机械运动的稳定性，通过与发电机有功相关物理量的运算形成所需的 $I_{fy}(U_{fy})$，构成发电机有功调节通道。无功通道的主要功能是以发电机端电压或无功状态为反馈量，达到控制发电机端电压或无功运行状态的目的。

根据图 2.9-2 可以写出异步化汽轮发电机双通道（即有功、无功通道）控制方程为

$$\begin{aligned}U_{fy}&=U_{fy0}+[K_p(p_e-p_{e0})+K_\delta(\delta-\delta_0)+K_s(s-s_0)+K_{if}(i_{fq}-i_{fd})]R_f/X_{af}\\U_{fx}&=U_{fx0}+K_U(U_t-U_{t0})R_f/X_{af}\end{aligned} \quad (2.9\text{-}15)$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式中，U_{fy0}、U_{fx0}为前一状态的计算值；R_f/X_{ad}为将励磁电压以额定空载励磁电动势为基值归算到定子侧的系数。

对异步化汽轮发电机，由于转子本体是整块实心体，铣槽后嵌入绕组构成转子，转子实心体中的涡流引起的发热严格地限制了发电机长期稳定运行的转差率（为10^{-3}数量级），涡流的存在增大了自动励磁调节系统的电磁惯性，即增大了调节系统的时间常数。如要求异步化汽轮发电机带转差（即$s\neq0$）长期稳定运行，并保证转子发热不超过限值，由图2.9-2可知电网电压等的测量及检测后信号的加工（构成）精度应不低于10^{-4}级，采用现有的检测技术难于满足精度要求。因此目前的异步化汽轮发电机仅考虑$s=0$长期稳态运行，即稳态运行时发电机转子两相励磁绕组通以相等的直流电流励磁，由此建立上述同步轴系下的励磁控制方程。

在有功调节通道中，引入转子q轴绕组轴线相对于电网电压相量或发电机定子电压相量的夹角，即转子位置角（δ）的反馈，是保证发电机稳态运行时有恒定的δ角，即能保证发电机$s=0$长期稳定运行。在发电机处于过渡过程时，其转差率将不为零，因此采用s反馈是合理的，因为这项反馈等效为δ的导数反馈，可改善发电机的动态特性，缩短发电机的动态过程，这是因为发电机在过渡过程中（$s\neq0$），转子对称两相绕组与定子磁场有相对运动，在转子绕组中存在sf_1的感应电流，该电流与定子磁场互相作用必然产生瞬时异步转矩，无论s是正或是负，该异步转矩都将阻尼转子转速的振荡。引入有功功率P反馈的目的是补偿实心转子涡流及励磁系统的电磁惯性，使发电机输出有功功率能快速跟踪原动机的功率变化。$\Delta i_f=i_{fq}-i_{fd}$反馈的目的是为了保证发电机稳态运行时d、q两相励磁绕组中的电流相等，即$i_{fq}=i_{fd}$，使转子热负荷均衡及获得较好的转子两相合成励磁磁动势的波形，转子两相励磁电流调平（相等）的过程，必然伴随着δ的缓慢校正过程，该过程对发电机的动态过程不产生实质的影响。

在无功调节通道中，可视电站的需要和可能，实施电压或输出无功的反馈，保证发电机顺利实现电压或无功的调节。

3.2 有功和无功（电压）调节特性

3.2.1 有功功率调节前后稳态运行的相量图

以异步化汽轮发电机在保持输出无功（或机端电压）不变时，调节输出有功功率后稳态运行相量图的改变，进一步了解异步化汽轮发电机各物理量的变化，对深入理解异步化汽轮发电机的特点是有益的。

图2.9-6为保证发电机输出无功不变，减少有功输出前后稳态运行的相量图。

根据式（2.9-13）可知，当保证无功不变调节有功时，励磁电压应作相应的改变，改变的原则是：保持I_{fx}不变，根据有功的调节方向改变合成励磁电流在y轴上的投影I_{fy}，为使稳态运行时满足$I_{fd}=I_{fq}$，转子位置角（即y轴与q轴间的夹角δ）必须在有功调节后发生改变。设原始稳定运行状态的物理量用下标“1”表示，有功调节后稳定运行状态的各物理量用下标“2”表示。由相量图可以看出以下特点：

1）$I_{fd1}=I_{fq1}$，$I_{fd2}=I_{fq2}$，$I_{fd2}(I_{fq2})<I_{fd1}(I_{fq1})$

2）$I_{fx1}=I_{fx2}=I_{fx}$

3）$I_{fy2}<I_{fy1}$

4）$\delta_2<\delta_1$

上述特点说明：

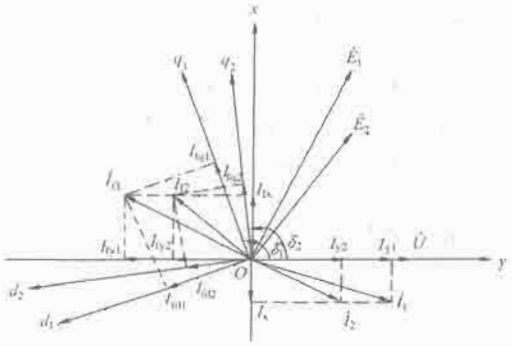


图2.9-6 保持无功不变，有功下调后的稳态相量图

具有转子对称两相绕组的异步化汽轮发电机可实现有功的独立调节，不影响无功运行状态；无功运行状态并非单值的决定于励磁电流的大小而与转子位置角δ密切相关。即对应于不同的有功输出，可通过调节d、q绕组中的励磁电流和转子位置角，使发电机输出的无功功率保持恒定。

3.2.2 无功功率调节前后的相量图

以异步化汽轮发电机保持有功输出不变，从发无功运行到吸无功运行稳态相量图的改变为例，研究其无功调节过程。此时，画相量图的原则是应保持合成励磁电流在y轴上的分量I_{fy}不变，即保证有功输出不变，按无功的要求改变合成励磁电流在x轴上的投影I_{fx}，同时要求无功改变后稳态运行时d、q两相励磁绕组中的电流应相等。异步化汽轮发电机从发无功变化到吸无功运行时各物理量的变化过程如图2.9-7所示。

图2.9-7（a）为异步化汽轮发电机在发无功运行下的稳态相量图。由于异步化汽轮发电机双通道励磁控制特点，其无功调节过程仅需改变转子两个励磁绕组中电流的大小即可完成，因此无功调节过程是一个纯粹的电磁过程。即有功调节通道中的励磁电流调平项在无功调节过程中不参与作用，待无功调节完成后再逐步校正δ，均衡转子两相励磁电流直至两相励磁电流相等整个调节过程结束。图2.9-7（b）表示相同有功下无功满足调节要求后的相量图。图2.9-7（c）表示当无功调节完成后，经角位置校正转子两相励磁电流相等后的相量图。图2.9-7（a）～图2.9-7（b）过程的长短决定于系统的电磁时间常数及无功通道反馈系数K_U（K_Q）的大小，由图2.9-7（b）～图2.9-7（c）是一个机的过程，其时间长短决定于系统的机械时间常数及有功通道电流调平项的反馈系数K_{if}。

由图2.9-7可以看出以下特点：

1）$I_{fy1}=I_{fy2}=I_{fy3}$，$\dot{E}_{01}$、$\dot{E}_{02}$、$\dot{E}_{03}$在x轴上的投影不变，即保持输出有功恒定。

2）$\delta_2=\delta_1$，$\theta_2\neq\theta_1$，$I_{fq2}\neq I_{fd2}$完成无功调节。

3）$\delta_3\neq\delta_2$，$\theta_3=\theta_2$，$I_{fq3}=I_{fd3}$保持无功不变均衡转子两相电流。

这些特点充分说明了异步化汽轮发电机无功调节的物量过程。用相量图描述该物理过程是在系统电磁时间常数远小于系统机的时间常数的假定下得出的。实际的无功调节过程与双通道励磁反馈系数K_U（K_Q）、K_{if}的选择是有关系的，严格地说无功调节与转子两相电流均衡的过程是同时发生的，只是前者持续的时间较短（即较快），后者持续的时间较长（即较缓慢）。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

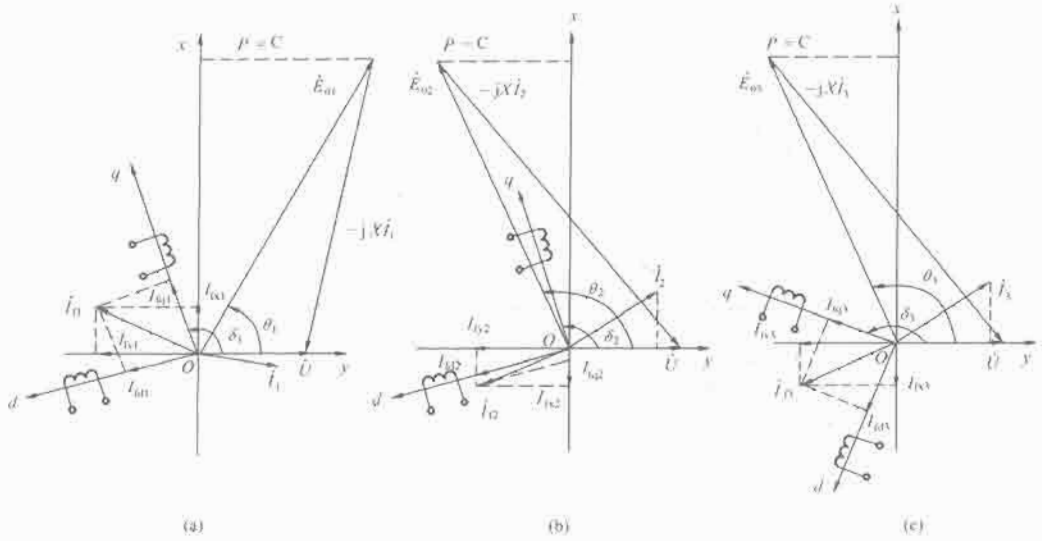


图 2.9-7　从发无功到吸无功稳定后的相量图

3.3　暂态特性

异步化汽轮发电机具有对称两相励磁绕组，在过渡过程中，可以通过改变加在励磁绕组上的励磁电压大小和极性实现合成励磁磁动势在空间的最佳定位控制，从而保证发电机在过渡过程中有足够的电磁转矩，提高发电机的暂态稳定性。

由图 2.9-2 可知，自动励磁调节器的控制信号在两个通道内按式（2.9-15）形成。在有功通道中，按有功、转子位置角和转差的反馈所得到的最大控制信号 $\dot{U}_{fy}$ 或 $\dot{I}_{fy}$ 是在与电压相量呈 180°相位差的方向（即 y 轴反方向）上。在无功通道中，按电压反馈作用下所形成的最大控制信号 $\dot{U}_{fx}$ 或 $\dot{I}_{fx}$ 在与电压相量呈 90°相位差的方向（即 x 轴正方向）上。在两个通道输出控制信号都为最大信号时，合成总信号 $\dot{U}_f$ 或 $\dot{I}_f$ 与电压相量 $\dot{U}$ 的相位差为 135°。在不同转子位置角 δ 的情况下，为满足上述条件，将由 d、q 绕组励磁电压的大小，极性改变的不同组合来给予保证。图 2.9-8 给出了保证 $\dot{U}_f$ 或 $\dot{I}_f$ 位置时不同转子位置角 δ 时 d、q 绕组励磁电压的极性。

图 2.9-8 的各相量关系是以所示 δ 区间的平均 δ 值画出的。例如图 2.9-8（a）中 $\delta=90°$，为满足 $\dot{U}_f$ 的大小和位置，当 $\delta=45°$ 时，$U_{fq}=0$，$U_{fd}=U_f$；$\delta=135°$ 时，$U_{fd}=0$，$U_{fq}=U_f$；当 δ 在 45°～135°时，$U_{fq}\neq0$，$U_{fd}\neq0$。同理可得图 2.9-8（b）、图 2.9-8（c），不同 δ 时 d、q 励磁绕组电压极性的改变规律。上述 $\dot{U}_f$ 或 $\dot{I}_f$ 最佳空间位置及大小，是由异步化汽轮发电机双通道励磁控制来保证的。

上述的分析说明异步化汽轮发电机出现机的过渡过程时（即 δ 发生变化），可通过 d、q 绕组上励磁电压大小和极性的控制，获得最佳的合成励磁磁动势，提高发电机的暂态稳定性。另一方面从过渡过程中电磁转矩的分析，也可得到同样的结论。

异步化汽轮发电机暂态过程中的电磁转矩，可按式（2.9-13）表示为

$$T_\varphi=-\frac{UX_{ad}}{X}i_{fy\varphi}=-\frac{UX_{ad}}{X}i_{f\varphi}\cos(\delta+\gamma)=\frac{UX_{ad}}{X}i_{f\varphi}\sin\theta_\varphi \tag{2.9-16}$$

式中，$i_{f\varphi}=\sqrt{i_{fd\varphi}^2+i_{fq\varphi}^2}$ 为 d、q 励磁电流控制后的合成励磁电流，γ 为 q 轴与合成励磁磁动势轴线的夹角，当时 $i_{fd}=i_{fq}$，$\gamma=45°$，一般情况下 $\gamma=\arctan i_{fd}/i_{fq}$，$\theta_\varphi=\delta+\gamma-90°$。

异步化汽轮发电机与同步汽轮发电机暂态过程的差异可用图 2.9-9 说明。

当发电机发生线路三相短路时，$U=0$ 和 $M=0$，只有汽轮机转矩作用在电机转子上，转子开始加速，δ 增大，在切除故障线路后电压开始恢复时，进行强励，此时电磁力矩由式（2.9-16）确定。正如前述由于 i_{fd} 和 i_{fq} 的大小、方向可控。因此，即使在 δ 变化的情况下，通过 γ 的控制维持 θ_φ 接近 90°，使暂态过程中有良好的功角特性，这是传统同步发电机不具备的。加之 i_{fd} 或 i_{fq} 的强励，保证发电机有足够的暂态电磁力矩，提高了发电机的暂态稳定性。

图 2.9-9（a）表明在起始 δ 不大时，随转子的加速过

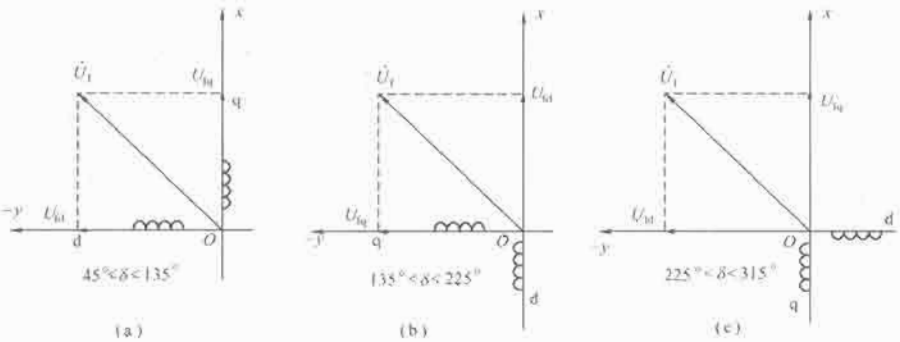


图 2.9-8　不同 δ 时合成励磁磁动势与励磁电压极性关系

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

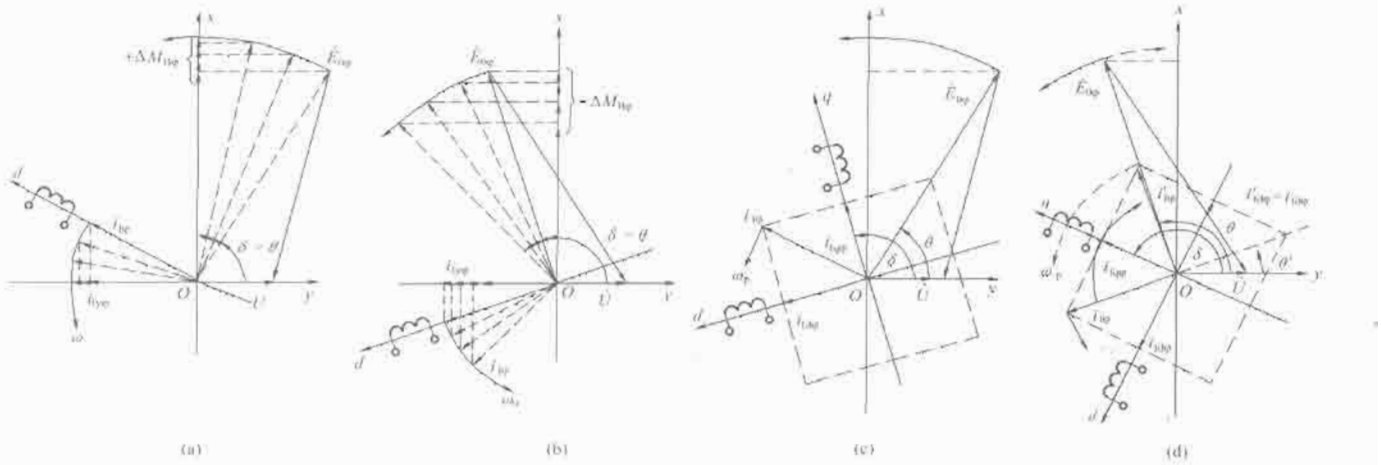


图 2.9-9 在 δ 角增大过程中，传统同步发电机和异步化汽轮发电机相量图的变化

(a) 传统同步发电机发无功时；(b) 传统同步发电机吸无功时；(c) 异步化汽轮发电机发无功时；(d) 异步化汽轮发电机吸无功时

程，即使保持原有的励磁电流不变，电磁转矩（由 $\dot{E}_0$ 在 x 轴上的投影表示）也是逐渐增大的，如能在故障切除后迅速强励，即可增大电磁转矩而使过渡过程平稳结束；图 2.9-9 (b) 由于起始 δ 较大，随着转子的加速，电磁转矩逐渐减小，故障切除后必须提高强励倍数才有可能使电机不失去稳定；图 2.9-9 (c)、图 2.9-9 (d) 表明异步化汽轮发电机无论无功运行状态（即起始 δ 角的大小）如何，都可通过 I_{fd} 和 I_{fq} 大小和方向的控制使电机在过渡过程中保持较高的暂态电磁转矩，以提高发电机暂态稳定性。

4 异步化汽轮发电机电磁设计特点

4.1 气隙的选取原则

当异步化汽轮发电机为 d、q 双轴均衡（即 $I_{fd}=I_{fq}$）励磁时，用 I_{fd} 和 I_{fq} 分别表示 d、q 励磁绕组中的电流，则合成励磁磁动势应为

$$F_1 = \sqrt{2}WI_{fd}$$

式中，W 为每相励磁绕组的有效匝数。

然而若将 q 轴绕组置于 d 轴上，并与 d 轴绕组顺串联，通以电流 I_{fd}，即为单轴同步发电机其励磁磁动势应为

$$F_2 = 2WI_{fd}$$

可见，对异步化汽轮发电机和单轴同步发电机，在转子冷却条件相同的情况下，为保持它们转子热负荷相等，则必有

$$F_1 = \frac{F_2}{\sqrt{2}} \tag{2.9-17}$$

即在上述条件下异步化汽轮发电机的励磁磁动势仅为单轴同步发电机磁动势的 $1/\sqrt{2}$ 倍。

当两机有相同的主要尺寸 D 和 l，在相同的定子有效匝数及励磁磁动势符合式 (2.9-17) 情况下，要异步化汽轮发电机与单轴同步汽轮发电机有相同的机电能量转换能力，两机必须能产生相同的电磁转矩。按虚位移原理，利用气隙磁场储能写出电磁转矩的表达式

$$T_m = \frac{dW_m}{d\theta} \tag{2.9-18}$$

式中，$d\theta$ 为转子相对定子轴线位置角的增量；dW_m 为与 $d\theta$ 相应的气隙磁场储能的增量，对异步化汽轮发电机当有位置角增量 $d\theta$ 时，则气隙磁场储能的增量为

$$dW_{m1} = \omega_{m1} dV_1 = \omega_{m1}\delta_1 lR_1 d\theta \tag{2.9-19}$$

对同步发电机当有位置角增量 $d\theta$ 时，则

$$dW_{m2} = \omega_{m2} dV_2 = \omega_{m2}\delta_2 lR_2 d\theta \tag{2.9-20}$$

上两式中，R_1、R_2 分别为异步化汽轮发电机和同步发电机平均气隙处的半径，可以认为近似相等；ω_{m1} 和 ω_{m2} 为异步化汽轮发电机和同步发电机气隙储能密度（即单位体积内的磁场储能），由式 (2.9-18) ～式 (2.9-20) 可知，要满足两机电磁转矩相等，则应有

$$\omega_{m1}\delta_1 = \omega_{m2}\delta_2$$

气隙储能密度可用相应电机的场量表示为

$$\omega_{m1} = \mu_0 H_1^2/2; \omega_{m2} = \mu_0 H_2^2/2$$

因此，可用同步发电机的气隙 δ_2 表示异步化汽轮发电机的气隙 δ_1，即

$$\delta_1 = \delta_2 H_2^2/H_1^2 \tag{2.9-21}$$

设两机气隙磁动势为全磁动势的 70%，则应有

$$F_{\delta 1} = 0.7F_1; F_{\delta 2} = 0.7F_2$$

由式 (2.9-17) 可得

$$F_{\delta 1} = 0.7F_2/\sqrt{2} = F_{\delta 2}/\sqrt{2}$$

$$H_1 = F_{\delta 1}/\delta_1; H_2 = F_{\delta 2}/\delta_2; H_1 = F_{\delta 1}/\delta_1\sqrt{2} \tag{2.9-22}$$

将式 (2.9-22) 代入式 (2.9-21)，得

$$\delta_1 = \delta_2/2 \tag{2.9-23}$$

因此，设计异步化汽轮发电机时，可按式 (2.9-23) 参照同容量同步发电机的气隙，初选其气隙值。

然而，异步化汽轮发电机气隙的减小将受到定子齿谐波在转子实心体中引起的附加损耗允许值所限制。定子齿谐波在转子表面产生的附加损耗与气隙长度 δ 及定子齿距 t_1 的比值密切相关与函数 $\varphi(\delta/t_1)$ 成反比变化。分析表明，当比值 δ/t_1 低于 0.45～0.5 时，这种损耗急剧增加；当比值 $\delta/t_1 \approx 0.2$ 时，这种损耗约占汽轮发电机额定功率的 1%左右。所以为减少定子齿谐波在转子表的附加损耗，气隙的取值仍应大于半个定子齿距，即

$$\delta \geqslant t_1/2$$

因此，异步化汽轮发电机气隙的取值应特别注意与定子槽数选择相配合。至于气隙大小对同步发电机稳定性影响的问题，在异步化汽轮发电机中已不存在了。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4.2　转子绕组的设计

异步化汽轮发电机转子两相励磁绕组设计时应遵从如下三条原则：

1）两相励磁绕组共同产生的合成励磁磁动势有尽可能大的磁动势基波，尽可能少的谐波磁动势含量和尽可能小的谐波磁动势幅值，且不同励磁电流（$I_{fd}=I_{fq}$）稳态运行时，不会改变合成励磁磁动势的谐波含量及谐波与基波的幅值比。

2）异步化汽轮发电机的转子两相励磁绕组应能满足其任一相励磁系统（或绕组）故障时，发电机仍能长期稳定运行。因此在设计励磁绕组时，应考虑在任一相励磁绕组断电后，即异步化汽轮发电机单轴运行时，仍有较好的单轴励磁的磁动势波形。

3）异步化汽轮发电机的转子励磁绕组必须是对称绕组，当采用两相励磁绕组时，两相绕组的轴线在空间必须相差 90°电角度（对汽轮发电机即 90°机械角度），且有相同的绕组阻抗参数，以满足异步化汽轮发电机在两相励磁系统故障时，异步化汽轮发电机可转入不可控异步状态长期稳定运行。

4.2.1　γ=44/48 的转子两相励磁绕组排列

图 2.9-10 中的 t 为转子计算齿距，其值为

$$t=\frac{\pi D_2}{Z_2'}$$

图 2.9-10 是参照国产汽轮发电机转子槽分度数 $Z_2'=48$ 的转子两相励磁绕组排列方案，该方案异步化汽轮发电机转子实槽数 $Z_2=44$。虚槽号 12、24、36、48 处未开槽，形成四个宽齿。因此，这种绕组排列方案是在转子实槽数不均匀但分布对称的 44 个槽中安放轴线正交的两相励磁绕组。为了使异步化汽轮发电机稳态运行（即两相励磁绕组通入相等电流）时，异步化汽轮发电机转子合成励磁磁动势波形与传统汽轮发电机转子励磁波形类似（即两极梯形波），在转子的部分槽中应同时安放两相绕组，形成双层绕组，并使部分双层绕组的槽磁动势为零，形成励磁磁动势波形的平顶部分。其余的转子槽中仅安放一相（即单层）绕组，在转子的 44 个槽中形成单、双层正交两相绕相。调整双层绕组所占的转子槽数，可改变两相绕组合成励磁磁动势的波形。

图 2.9-11 为异步化汽轮发电机转子励磁绕组一相断电后，即单轴励磁运行时的励磁磁动势波形。同样该磁动势波形随两相励磁绕组单、双层绕组所占的槽数不同而变化。

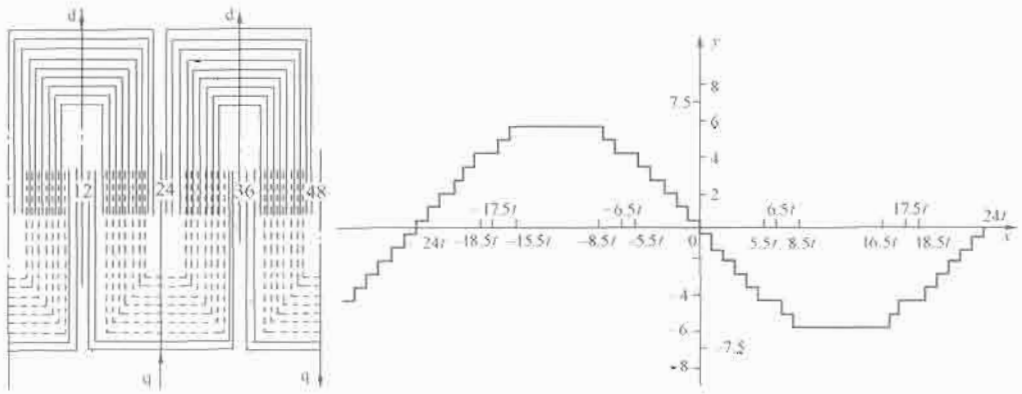


图 2.9-10　γ=44/48 时两相励磁绕组排列及其励磁磁动势波形的示意图

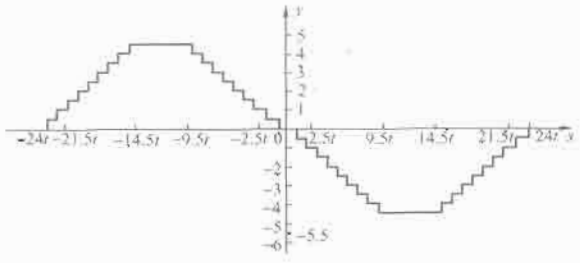


图 2.9-11　与图 2.9-10 绕组排列对应的单轴励磁的磁动势波形

4.2.2　γ=48/48 的转子两相励磁绕组排列

这种异步化汽轮发电机转子实槽数与槽分度数相等，即 $Z_2=Z_2'=48$，因此该排列方案是转子两相励磁绕组均匀分布在转子的所有槽中，形成轴线正交的两相分布绕组。与前述排列方案相同的是转子部分槽中安放两相绕组，余下的槽中安放一相绕组。该方案的转子绕组及相应励磁磁动势波形的示意图如图 2.9-12 所示。图 2.9-13 为异步化汽轮发电机转子励磁绕组--相断电后，单轴励磁时的磁动势波形图。

对 γ=44/48 及 γ=48/48 两种异步化汽轮发电机转子的两相及一相励磁绕组的磁动势波形进行详细的谐波分析，分析结果表明 γ=44/48 绕组排列有较少的谐波含量及较小谐波幅值，并将 γ=48/48 双轴励磁与传统汽轮发电机 γ=32/48单轴励磁的磁动势波形进行了谐波对比分析，分析

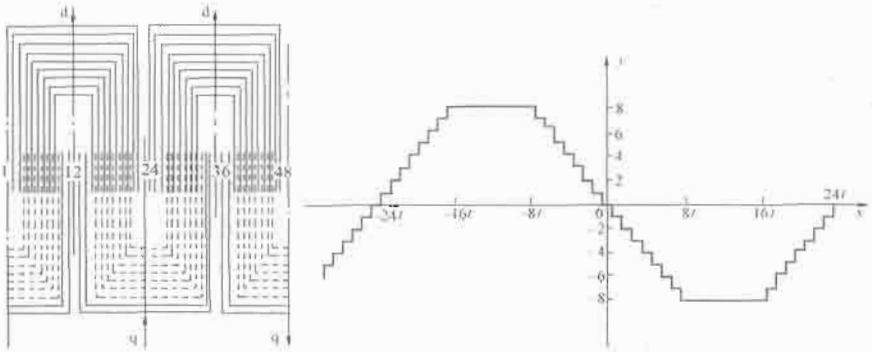


图 2.9-12　γ=48/48 时两相励磁绕组排列及其励磁磁动势波形的示意图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

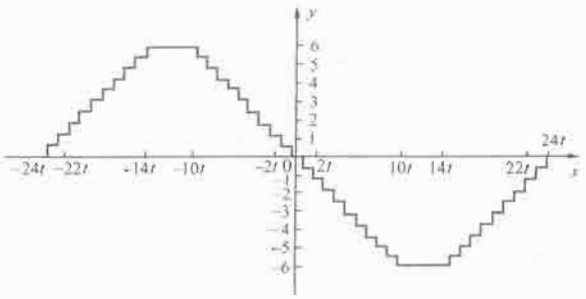


图 2.9-13 与图 2.9-12 绕组排列对应的单轴励磁的磁动势波形

结果表明两者有相同的谐波含量，前者有较小的谐波幅值。

5 交流励磁同步发电机数学模型及控制原理

5.1 电气结构及运行原理

交流励磁发电机电机本体的结构与绕线转子异步电机相同。转子上采用三相（或两相）对称分布的励磁绕组，对称交流电励磁，且励磁电压的频率、大小、相位、相序都可以控制。传统同步发电机采用集中的励磁绕组，其励磁电流为直流，因而只能控制励磁电压幅值的大小，来控制励磁电流，且转子磁场相对转子本体的位置是固定不变的，当进行有功、无功调节时，必然伴随转子的过渡过程。而交流励磁发电机则不同，由于其转子励磁绕组为多相对称绕组，且励磁电压为相位、幅值、频率可变的对称交流电，可通过调节励磁电压幅值、频率、相位来控制发电机励磁磁场大小、相对转子本体的位置和电机的转速，由于交流励磁发电机励磁控制自由度的增加，使得该类电机具有超越传统同步发电机的性能。

交流励磁发电机系统通常可采用两种控制方式，图 2.9-14（a）所示为频率他控式，图 2.9-14（b）所示为频率自控式，两种控制方式虽然都能根据转速给定信号来控制发电机转速，但频率他控式由于没有采用转速闭环系统，在动态过程中，励磁电压频率不能跟随转速的变化而变化，因而存在失步问题，而频率自控式由于采用了转速闭环系统，使得转子励磁电压的频率受控于转速给定值和转速的实际值，所以不存在转子运动失步问题，因而交流励磁发电机系统通常采用自控制方式，以最大限度地发挥其优势。

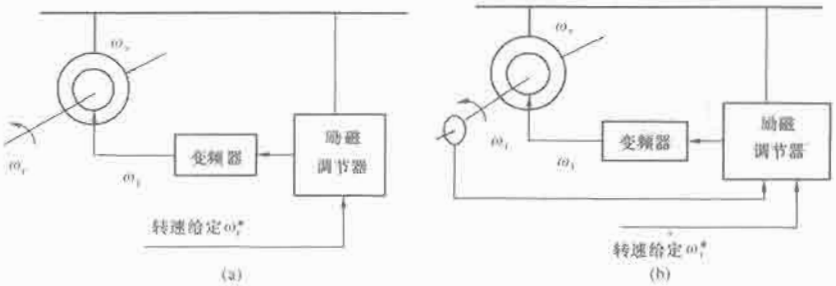


图 2.9-14 交流励磁发电机的控制方式
（a）他控式；（b）自控式

交流励磁发电机稳态运行时，其转子励磁频率可根据所需电机的转速加以控制，以满足机电能量转换条件

$$\omega_s = \omega_r \pm \omega_f \tag{2.9-24}$$

式中，ω_s 为电网角频率；ω_r 为转子旋转角频率；ω_f 为励磁电压角频率。

5.2 基本电磁关系与数学模型

交流励磁发电机定、转子结构与绕线转子异步电机相同；其定子和传统同步发电机的定子完全一样，转子上嵌有两相或三相对称绕组。本节的目的，就是首先根据异步电机的等效电路来推导交流励磁发电机的等效电路，进而研究其基本方程、相量图、功率的关系等，以及有功、无功调节时内部的电磁物理过程，为进一步研究交流励磁发电机的设计与控制奠定基础。

5.2.1 电压方程式、等效电路和相量图

交流励磁发电机与绕线转子异步电机不同之处在于当其正常运行时，转子绕组外接交流电源励磁，当定子方电压电流正方向按发电机惯例，转子方电压电流正方向按电动机惯例，电磁转矩与转向相反为正，转差率 s 按转子速度小于同步速度为正，大于同步速度为负，参照异步电机的分析方法，将转子方的量折算到定子方，可得交流励磁发电机的等效电路，如图 2.9-15 所示。

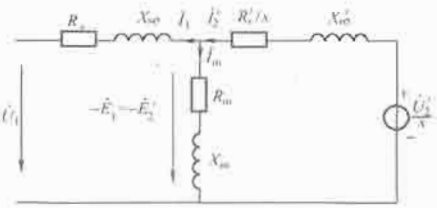


图 2.9-15 交流励磁发电机等效电路图

根据等效电路图 2.9-15，可得交流励磁发电机的基本方程式（2.9-25），根据基本方程式可进一步画出交流励磁发电机的相量图，如图 2.9-16 所示。

$$\left.\begin{aligned}
\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{I}_1(R_s + jX_{s\sigma}) \\
\frac{\dot{U}_2'}{s} &= -\dot{E}_2' + \dot{I}_2'\left(\frac{R_r'}{s} + jX_{r\sigma}'\right) \\
\dot{E}_1 &= \dot{E}_2' = -\dot{I}_m(R_m + jX_m) \\
\dot{I}_1 &= \dot{I}_2' - \dot{I}_m
\end{aligned}\right\} \tag{2.9-25}$$

式中，R_s、$X_{s\sigma}$ 为定子方的电阻与漏抗；R_r'、$X'_{r\sigma}$ 为转子方且折算到定子方的电阻与漏抗；$R_m + jX_m$ 为励磁阻抗；$\dot{U}_1$、$\dot{E}_1$、$\dot{I}_1$ 分别为定子方的电压、感应电动势和电流。

图 2.9-16 中 $\dot{\Phi}_m$ 为交流励磁发电机的气隙磁通向量；α 为转子励磁电压相量 $\dot{U}'_{2f}$ 超前定子电压相量的相角；α_{Fe} 为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

铁耗角；φ_1 为定子的功率因数角；φ_2 为转子电流 $\dot{I}'_2$ 滞后 $\dot{E}'_2$ 的相角；对于传统的异步电机 $\dot{I}'_2$ 的大小和滞后 $\dot{E}'_2$ 的相角 φ_2 在定子电压一定时，仅取决于异步电机转子运行的转差率 s 和转子参数，即当 s 一定时，$\dot{I}'_2$ 大小和滞后 $\dot{E}'_2$ 的相位 φ_2 也就确定，从而使得其定子电流 $\dot{I}_1$ 的大小和相位以及定子有功、无功功率也就确定，且不管 s 为何值，异步电机都必须从电网吸收滞后无功励磁。而对于交流励磁发电机，$\dot{I}'_2$ 的大小不仅取决于 s，同时更重要的是它将随着转子励磁电压相量 $\dot{U}'_{2/s}$ 的变化而变化，从相量图中可以看到，交流励磁发电机的转子电流 $\dot{I}'_2$，可认为是由两个分量构成，一个是气隙电动势 $\dot{E}'_2$，确定的 $\dot{I}'_{21}$ 分量，另一个是转子励磁电压 $\dot{U}'_{2/s}$ 所确定的 $\dot{I}'_{21}$，改变转子励磁电压 $\dot{U}'_{2/s}$ 的大小和相位，虽然 $\dot{I}'_{21}$ 不变，但由 $\dot{U}'_{2/s}$ 确定的 $\dot{I}'_{22}$ 将随之改变，进而可改变 $\dot{I}'_2$ 的大小和相位，且可使其在空间任一位置，从而使得交流励磁发电机可工作于任何有功、无功组合状态。

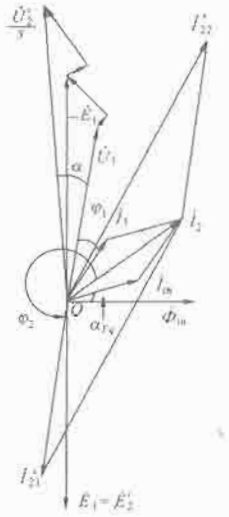


图 2.9-16　交流励磁发电机相量图

5.2.2　通过气隙传递的电磁功率和无功功率

经气隙传递的电磁功率

$$P_{em}=R_e[\dot{E}_1\dot{I}'^{*}_2] \tag{2.9-26}$$

$$\begin{aligned}P_{em}=&-\frac{U_1^2}{C}\left[\frac{R'_r}{s}(X_m^2+R_m^2)+R_mX'_{r\sigma}(X_{s\sigma}+X'_{r\sigma})-X_{s\sigma}X'_{r\sigma}R_m\right]+\frac{U_2'^2}{s^2C}\left[R_s(X_m^2+R_m^2)+R_m(X_{s\sigma}^2+R_s^2)\right]+\\&\frac{U_1U'_2}{sC}\left[\left(\frac{R'_rR_m^2}{s}+X_{s\sigma}X'_{r\sigma}R_m-R_sX_m^2-R_sR_m^2-\frac{R_sR'_rR_m}{s}-R_sX_mX'_{r\sigma}+\frac{R'_rX_{s\sigma}X_m}{s}+\frac{R'_rX_m^2}{s}+\frac{2R_sR'_rR_m}{s}\right)\cos\alpha+\left(X'_{r\sigma}R_mR_s+\frac{R'_rR_sX_m}{s}-\frac{R'_rX_{s\sigma}R_m}{s}+R_m^2X'_{r\sigma}+X_{s\sigma}R_m^2+\frac{R_sR_mX_m}{s}+X_{s\sigma}X_m^2-\frac{R'_rR_mX_m}{s}+X_m^2X'_{r\sigma}+X_{s\sigma}X_mX'_{r\sigma}\right)\sin\alpha\right]\end{aligned} \tag{2.9-27}$$

式中，

$$A=\left[R_s\left(R_m+\frac{R'_r}{s}\right)+\frac{R'_rR_m}{s}-X_{s\sigma}(X_m+X'_{r\sigma})-X_mX'_{r\sigma}\right]$$

$$B=\left[R_s(X_m+X'_{r\sigma})+R_mX'_{r\sigma}+X_{s\sigma}R_m+\frac{R'_r}{s}(X_{s\sigma}+X_m)\right]$$

$$C=A^2+B^2$$

从式（2.9-27）中可知交流励磁发电机的电磁功率在电机参数一定的条件下，由三部分组成，第一部分 $-\frac{U_1^2}{C}\times\left[\frac{R'_r}{s}(X_m^2+R_m^2)+R_mX'_{r\sigma}(X_{s\sigma}+X'_{r\sigma})-X_{s\sigma}X'_{r\sigma}R_m\right]$ 仅与定子电压大小和转差率 s 有关，在 U_1 一定时，此项随 s 的变化曲线与传统异步电机的电磁功率随 s 的变化曲线完全相同，当 s 为负时，功率由气隙传递到定子方，为发电功率；当 s 为正时，功率由定子方传递到气隙，为电动功率，它实际上是由定子电压所引起的异步功率分量。

同理可进一步分析通过气隙传递的无功功率

$$Q_{qx}=I_m(\dot{E}_1\dot{I}'^{*}_2) \tag{2.9-28}$$

$$\begin{aligned}Q_{qx}=&\frac{U_2'^2}{s^2C}\left[R_s(X_m^2+R_m^2)+R_m(X_{s\sigma}^2+R_s^2)\right]-\frac{U_1^2}{C}\times(X_m^2+R_m^2)X'_{r\sigma}+\frac{3U_2'^2}{s^2C}\left[X_{s\sigma}(X_m^2+R_m^2)+X_m(X_{s\sigma}^2+R_1^2)\right]-\frac{U_1U'_2}{sC}\left[\left(X_{s\sigma}X_m^2+X_{s\sigma}R_m-\frac{R_sR'_rX_m}{s}-X_{s\sigma}X_mX'_{r\sigma}-X_m^2X'_{r\sigma}-R_sX'_{r\sigma}R_m-R_m^2X'_{r\sigma}+\frac{X_{s\sigma}R'_rR_m}{s}\right)\cos\alpha+\left(R_sR_m^2+\frac{R'_rR_sR_m}{s}+\frac{R'_rR_m}{s}+R_sX_m^2+\frac{R'_rX_m^2}{s}+X'_{r\sigma}X_{s\sigma}R_m+\frac{R'_rX_{s\sigma}X_m}{s}-R_sX_mX'_{r\sigma}\right)\sin\alpha\right]\end{aligned} \tag{2.9-29}$$

式（2.9-29）表明，交流励磁发电机的无功功率 Q_{qx} 也是由三部分组成，由定子电压大小和转差率 s 决定的 $-\frac{U_1^2}{C}\times(X_m^2+R_m^2)X'_{r\sigma}$ 分量，由转子电压大小和转差率 s 决定的 $\frac{U_2'^2}{s^2C}\left[R_s(X_m^2+R_m^2)+R_m(X_{s\sigma}^2+R_s^2)\right]+\frac{U_2'^2}{s^2C}\left[X_{s\sigma}(X_m^2+R_m^2)+X_m(X_{s\sigma}^2+R_s^2)\right]$ 分量以及由定、转子电压大小和相位共同决定的分量 $-\frac{U_1U'_2}{sC}\left[\left(X_{s\sigma}X_m^2+X_{s\sigma}R_m-\frac{R_sR'_rX_m}{s}-X_{s\sigma}X_mX'_{r\sigma}-X_m^2X'_{r\sigma}-R_sX'_{r\sigma}R_m-R_m^2X'_{r\sigma}+\frac{X_{r\sigma}R'_{r\sigma}R_m}{s}\right)\cos\alpha+\left(R_sR_m^2+\frac{R'_rR_sR_m}{s}+\frac{R'_rR_m}{s}+R_sX_m^2+\frac{R'_rX_m^2}{s}+X'_{r\sigma}X_{s\sigma}R_m+\frac{R'_rX_{s\sigma}X_m}{s}-R_sX_mX'_{r\sigma}\right)\sin\alpha\right]$。第一部分无功分量不管 s 为正还是为负，总是吸收滞后无功；第二部分无功分量则不管 s 为正还是为负，总是发出滞后无功；而第三部无功分量，当定、转子电压大小以及转差率 s 一定时，无功的大小和性质将由定、转子相位角 α 来决定。

5.2.3　超同步转速运行时能流图

当交流励磁发电机超同步转速运行时，存在一个临界转差率 s_p，当 $s=s_p$ 时励磁系统输出有功为 0，$s\neq s_p$ 时，励磁系统或将电功率输入电机转子方或将电机转子方的电功率通过励磁系统回馈给电网。当交流励磁发电机运行于发电状态时，s_p 为负值，$s>s_p$ 时，励磁系统向电机转子方输入电功率；$s<s_p$ 时，励磁系统将转子方输出的电功率回馈给电网，如图 2.9-17 所示。而当交流励磁发电机运行于电动状态时，则刚好相反。

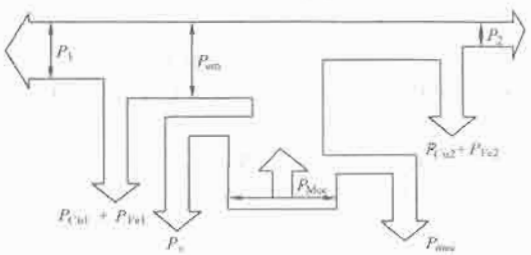


图 2.9-17　交流励磁发电机 $s<s_p$ 的能流示意图

5.2.4　数学模型

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

设发电机经一外接电抗 X_w 与无穷大系统相连，如图 2.9-18 所示，写出交流励磁发电机在 d-q 同步轴系下用标么值表示的电压电流方程见式（2.9-30）。

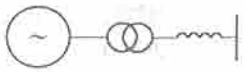


图 2.9-18 单机无穷大系统原理图

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s - \frac{X_\Sigma}{\omega_b}p & -X_\Sigma & \frac{X_M}{\omega_b}p & X_M \\ X_\Sigma & -R_s - \frac{X_\Sigma}{\omega_b}p & -X_M & \frac{X_\Sigma}{V}p \\ -\frac{X_M}{\omega_b}p & -sX_M & R_r + \frac{X_r}{\omega_b}p & sX_r \\ sX_M & -\frac{X_M}{\omega_b}p & -sX_r & R_r + \frac{X_r}{\omega_b}p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \tag{2.9-30}$$

式中，$X_\Sigma = X_s + X_w$；R_s、R_r为定、转子方电阻；s 为转差率；p 为微分算符；X_M为定、转互抗；X_s、X_r为定、转子全电抗；u_{sd}、u_{sq}、u_{rd}、u_{rq}、i_{sd}、i_{sq}、i_{rd}、i_{rq}分别表示同步坐标轴系电压电流，下标 d、q 分别表示 d 轴、q 轴分量，下标 s 表示定子的分量，而下标 r 则表示转子的分量。

令式（2.9-30）中的 $p=0$，可得交流励磁发电机在同步坐标轴系下的稳态电压电流方程

$$\begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \\ U_{rd} \\ U_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & -X_\Sigma & 0 & X_M \\ X_M & -R_s & -X_M & 0 \\ 0 & -sX_M & R_r & sX_r \\ sX_M & 0 & -sX_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \tag{2.9-31}$$

5.3 励磁控制原理

交流励磁发电机励磁控制系统大致可分为三类：一类是前苏联学者提出，并应用于异步化汽轮发电机上的双通道多变量反馈励磁控制系统；第二类是基于异步电机矢量控制所提出的矢量励磁控制系统；第三类是建立在电机多标量模型基础上的多标量励磁控制系统。这三类励磁控制系统的共同点都是，在电机数学模型的基础上，通过简化，找到其稳态情况下，有功、无功的解耦模型，从而构成励磁控制系统，且都能实现有功、无功的独立调节。

在矢量励磁控制中，如果将同步坐标轴系的 d 轴放在交流励磁发电机的气隙磁场相量上，即采用气隙磁场定向，且忽略定子漏阻抗，$U_{sd}\approx 0$，$U_{sq}\approx$常数，则交流励磁发电机的定子端有功、无功可表示为

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= U_{sq} I_{sq} \\ Q_1 &= -U_{sq} I_{sd} \end{aligned}\right\} \tag{2.9-32}$$

而定、转子电流有如下关系

$$I_{sd} + I_{rd} = 0 \tag{2.9-33}$$

$$\Psi_m = L_m (I_{sq} + I_{rq}) \tag{2.9-34}$$

式中，Ψ_m为气隙合成磁链；L_m为定、转子互感，则

$$P_1 \approx -U_{sq} I_{rq} \tag{2.9-35}$$

$$Q_1 \approx U_{sq} I_{rd} - (\Psi_m / L_m) U_{sq} \tag{2.9-36}$$

式（2.9-35）表明交流励磁发电机的定子有功决定于励磁电流的 q 轴分量；而式（2.9-36）则表明无功功率则由励磁电流的 d 轴分量以及气隙磁链 Ψ_m决定，在交流励磁发电机稳态运行时，Ψ_m 近似等于常数。因而控制交流励磁发电机的 I_{rq}、I_{rd}就可实现其有功、无功的独调节。为了得到励磁电流与励磁电压的关系式，可将式（2.9-30）改写成以下形式

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s - L_{s\sigma}p & -\omega_1 L_{s\sigma} & 0 & 0 \\ \omega_1 L_{s\sigma} & -R_s - L_{s\sigma}p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r + L_{r\sigma}p & sL_{r\sigma} \\ 0 & 0 & -sL_{r\sigma} & R_r + L_{r\sigma}p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -p & -\omega_1 & 0 & 0 \\ \omega_1 & -p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & s\omega_1 \\ 0 & 0 & -s\omega_1 & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} \tag{2.9-37}$$

式中，$L_{s\sigma}$、$L_{r\sigma}$为定转子漏感；Ψ_{sd}、Ψ_{sq}为定子，d、q 轴磁链；Ψ_{rd}、Ψ_{rq}为转子 d、q 轴磁链。

由式（2.9-37）可推导出转子电压方程式

$$\begin{bmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r + pL_{r\sigma} & -s\omega_1 L_{r\sigma} \\ s\omega_1 L_{r\sigma} & R_r + pL_{r\sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & s\omega_1 \\ -s\omega_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{bmatrix} \tag{2.9-38}$$

又 $\Psi_{sd} = \Psi_{rd} = \Psi_m$，$\Psi_{sq} = \Psi_{rq} = 0$

则励磁电流

$$i_{rd} = \frac{u_{rd} + s\omega_1 L_{r\sigma} - u_{sd}}{R_2 + pL_{r\sigma}} \tag{2.9-39}$$

$$i_{rq} = \frac{u_{rq} - s\omega L_{r\sigma} I_{rd} - u_{sq} + s\omega_1 \varphi_m}{R_2 + pL_{r\sigma}} \tag{2.9-40}$$

由于转子漏感 $L_{r\sigma}$较小，可近似忽略，则式（2.9-39）、式（2.9-40）可写成

$$I_{rd} \approx \frac{U_{rd}}{R_r} \tag{2.9-41}$$

$$I_{rq} \approx \frac{U_{rq} - U_{sq} + s\omega_1 \Psi_m}{R_r} \tag{2.9-42}$$

分别控制 U_{rd}、U_{rq}就可独立控制励磁电流的 d-q 轴分量，从而实现交流励磁发电机有功、无功的解耦控制。

6 交流励磁同步发电机运行特性

6.1 发电机有功、无功调节特性

交流励磁发电机正常运行时，如果有功、无功发生改变，必然导致发电机内部各物理量的过渡过程，当采用不同的励磁控制模型时，其过渡过程的响应存在着较大的差异，通过对交流励磁发电机有功、无功调节时内部物理过程的分析，可了解其物理本质。

6.1.1 有功调节

交流励磁发电机定子有功功率中，由定子电压大小和转差率 s 确定的异步功率分量，在发电机正常运行时，是不变的，它是不可控分量，交流励磁发电机正常运行时，同步功率分量是可控分量，由于同步功率分量既与定、转子电压大小有关，同时也与定、转子电压的相位差 α 有关，因此控制转子励磁电压的大小和相位，就能实现其有功的调节。稳态时，控制 α 的实质是控制转子磁场的位置，动态过程中，由于 α 的可控，可使转子磁场的位置可控，通过对 α 的控制，即使电机的转速发生变化，转子磁场位置也可保持不变，因此可按需要控制其有功大小，所以 α 具有传统同步发电机功角的含义，不同的是，交流励磁发电机的 α 可控，而同步发电机的功角必须通过转子位置的变化来实现。

当励磁电压频率大小和相位都不变时，增大原动机的有

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

功输出，交流励磁发电机的过渡过程和传统同步发电机增大原动机的有功输出的过渡过程相似，如图 2.9-19 所示，设变化前交流励磁发电机稳定运行在 a（有功运行点）、a′（无功运行点）点，a、a′点对应定子输出有功、无功为 P_{1a}、Q_{1a}，此时电磁转矩与原动机的拖动转矩相平衡。如果忽略损耗，原动机的输出功率也等于 P_{1a}，现增大原动机的输出功率到 P_{1b}，则拖动转矩大于电磁转矩，转子加速，虽然此时励磁电压的相位没有变，但因转子速度增加，α 也将增大，从而使得交流励磁发电机的同步功率分量增大。当 $\alpha=\alpha_b$ 时，电磁转矩与原动机的拖动转矩再度平衡，由于此时转子速度大于原稳定运行的速度，因而 α 将继续增大。但当 $\alpha>\alpha_b$ 时，电磁转矩将大于拖动转矩，转子又将减速，这时电机将围绕 b 点进行振荡，但因在振荡过程，转速的改变而产生的异步附加功率，具有阻尼作用，最后电机将在新的平衡点 b、b′点稳定运行。对于 b、b′点有

$$P_{1a}<P_{1b},\alpha_a<\alpha_b,Q_{1a}>Q_{1b}$$

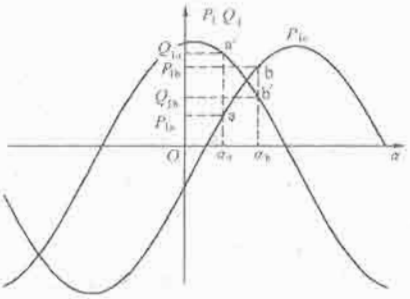


图 2.9-19　有功调节原理图

如果继续增大原动机的输出，则 α 将进一步增大，其定子有功也将增大，但如果原动机的输出大于 P_{1c}，则交流励磁发电机由于其同步功率分量将随 α 的增大而减小，从而使得其转子转速继续增大，最终导致发电机失去稳定。

以上分析表明，交流励磁发电机，在励磁电压频率、大小及相位不变的前提下，调节有功，其物理过程与传统同步发电机相似，有功增大，无功减小，当有功超过其最大功率时电机将失去稳定。但交流励磁发电机励磁电压大小、相位、频率都可控，当采用自控方式时，其励磁电压的频率可自动跟随发电机转速的变化，因而采用适当的控制策略，可以通过控励磁电压的大小和相位来改变其 α 的大小，使其在调节过程中满足原动机出力和负载变化的需要，从而提高交流励磁发电机的动态响应速度和系统的稳定性。

6.1.2　无功调节

传统同步发电机在调节无功时，也将伴随机电过渡过程，对于交流励磁发电机，如果不改变励磁电压的相位，而只改变励磁电压的大小，其无功调节的过渡过程与传统同步发电机相似，如图 2.9-20 所示。设交流励磁发电机稳定运行在 a（有功运行点），a′（无功运行点）点，此时有功、无功、α 分别为 P_{1a}、Q_{1a}、α_a，如果增大励磁电压，则交流励磁发电机的有功运行点将从 a 点变为 c 点，由于 $P_{1c}>P_{1a}$，电磁转矩大于拖动转矩，转子减速 α 减小，并经过一定的过渡过程后稳定运行在 b 点，而无功运行点从 a′点运行到 b′点，此时

$$P_{1a}=P_{1b},\alpha_b<\alpha_a,Q_{1a}<Q_{1b}$$

同样，如适当地控制励磁电压的大小、相位，可使交流励磁发电机能满足系统对发电机无功的需求，且交流励磁发电机的无功调节是纯粹的电磁过程。

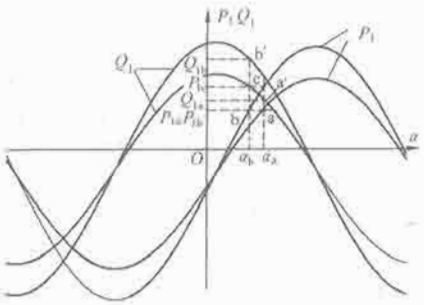


图 2.9-20　无功调节的原理图

6.2　暂态特性

由于交流励磁发电机转子为对称结构，因此其暂态特性与传统同步发电机有着很大的区别，其暂态稳定也与传统同步电机存在差异。传统同步发电机在发生突然短路时为了保持机组的暂态稳定性常采用强励的方法，强励的倍数以及励磁响应速度将直接影响同步发电机的暂态稳定性，对于交流励磁发电机，其励磁电源是交流电，当发生突然短路时，为了提高发电机暂态稳性，减小过渡过程时间，除了要考虑强励外（电压大小），励磁电源的响应速度、励磁电源频率变化的最大范围、过渡过程中励磁电压的相位控制等都对交流励磁发电机的暂态稳定性有着极大的影响。其强励倍数越大，励磁电源频率范围越大，励磁响应速度越快，交流励磁发电机的暂态稳定性也越好，故障切除后，电压回复过程时间越短，但提高励磁电源频率范围以及动态响应速度对发电机暂态稳定性提高比增大强励倍数（励磁电压大小）要好得多；交流励磁发电机由于其转子磁场位置成为可控，通过控制励磁电压的相位，可使交流励磁发电机具有更好的暂态稳定性。

7　交流励磁同步发电机电磁设计

交流励磁发电机本体结构与绕线转子异步电机相同，但运行方式与绕线转子异步电机存在较大的差异，由于交流励磁发电机转子方利用三相交流电源励磁，采用不同的励磁控制策略有不同运行方式，因此，在其电磁设计中，应根据不同的运行方式，作相应的考虑。

7.1　运行方式

对于交流励磁发电机三种不同的运行方式，其技术条件也有所差别。

7.1.1　变速恒频运行方式

主要用于大型水电站的前期发电，由于大型水电站发电初期水头低，而终期水头高，利用交流励磁发电机的可调速特性，可在初期和终期不换水轮，以减小电站的投资，提高电站效益；满足水轮机总是处于最佳比转速运行。此外，在可再生能源如风力、潮汐的发电中，由于原动机出力的波动，为提高发电效率，减小投资，也要求发电机转速能大范围地调节，对于这一类运行方式的交流励磁发电机，其技术条件除了和传统同步发电机一样有额定功率、电压、电流、功率因数、效率规定外，还应提出对该发电机运行转速范围的规定，因为交流励磁发电机的励磁容量在发电机极对数一定时，将随转速的变化而变化。

7.1.2　运行于无功大范围调节的方式

对于超高压长输电线，因轻载而出现电站和系统的无功过剩，从而造成电站持续工频过电压，传统同步发电机因受静态稳定性的限制，其吸无功能力有限，而交流励磁发电机

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

因不存在静稳定问题，可深度吸无功，从而可较好地解决电站因无功过剩而产生的持续工频过电压问题。当交流励磁发电机运行于这种方式时，其主要目的不是调速，而是调节无功，作为用于这种目的的交流励磁发电机应给出其功率因数的变化范围，因为在定子输出有功一定时，功率因数的变化也将导致励磁容量的改变。

7.1.3 运行于发电——电动方式

对于抽水蓄能电站，因用可逆式机组，具有较好的性能。日本的实际经验已证明，交流励磁发电机有着传统同步发电机无法比拟的优越性，对运行于这种方式的交流励磁发电机，由于工作于电动、发电状态时，要求其转速不同，因此应分别给出其运行于电动状态和发电状态时的额定功率、转速，以及在电动、发电两种运行状态下的效率、功率因数。同时由于工作于电动运行状态时，还有起动问题，因而起动转矩及起动方式也应作为技术条件，以利于交流励磁发电一电动机的设计。

7.2 电磁设计特点

由于交流励磁发电机的运行方式既不同于异步电机也不同于同步机，其电磁设计有其自身的特点。对于交流励磁发电机的设计，除了可参考一般异步电机或同步机的设计方法外，还应注意其身的特点。根据交流励磁发电机的运行原理以及其运行的方式，在设计中应主要考虑以下主要问题。

7.2.1 转子励磁绕组相数的选择

交流励磁发电机的转子励磁绕组的作用是产生转子旋转磁场，从理论上讲可以采用两相、三相或多于三相的对称绕组，但实现应用中，如采用超过三相的对称绕组，会增加励磁电源和励磁控制的难度和成本。而对于两相和三相对称绕组，在保持转子热负荷相等时所产生的合成磁动势的幅值是不等的，在转子热负荷相同的前提下，三相绕组所产生的磁动势大于两相绕组所产生的磁动势，因此，三相绕组比两相绕组有更高的利用率。

7.2.2 极对数的选择

传统同步电机，稳态运行时转子转速必须等于同步速度，而交流励磁发电机，由于是带转差运行，$s\neq0$，当发电机转速范围一定时，其极对数的选择不是唯一的，因交流励磁发电机在有功输出一定时，其励磁容量将随转差率 s 的绝对值增大而增大，因此为了降低励磁容量，极对数选取时应使在正常转速运行范围内励磁容量为最小，又因在交流励磁发电机有功输出、极对数一定时，其励磁容量存在一个最小值 $S_{\min}$，它所对应的转差率为 s_m，因而交流励磁发电机在转速范围一定时，极对数的选取应使其运行的转差率 s 尽可能地靠近 s_m，这将有利于励磁容量的减小。

7.2.3 气隙的选择

传统同步发电机，由于受静态稳定性的影响，一般其同步电抗不能太大，因而气隙则不能太小，但对于交流励磁发电机，由于不存在静态稳定性问题，因而气隙的选择可不考虑其对静态稳定性的影响，但交流励磁发电机在定子有功输出一定时，励磁容量与 X_m 有关，当气隙较大时，X_m 较小，Q_{lx} 较大，其励磁容量也将增大，传统同步机励磁容量一般为额定容量的2%以下，而交流励磁发电机的励磁容量可高达额定容量的30%，为尽可能的降低其励磁容量，交流励磁发电机应减小气隙长度，但气隙也不能过小，因为随着气隙的减小，由齿谐波所产生的附加铁损耗又将增大，所以对于交流励磁发电机的气隙应在考虑不影响效率、制造工艺能达到的前提下，尽可能减小气隙长度。

7.2.4 与主要尺寸相关的计算容量

电机的主要尺寸，在转速一定时，主要与计算容量有关，对于传统的同步机或异步机其能量传递的方向一般只有两种情况，第一种为定子吸收电功率，转子轴输出机械功率，此时的计算容量与额定值的关系为

$$P'=\frac{(1-\varepsilon_L)P_N}{\eta_N\cos\varphi_N} \tag{2.9-43}$$

式中，$1-\varepsilon_L$ 为额定运行时的电动势系数。

第二种为转子轴输入机械功率，定子输出电功率，其计算容量为

$$P'=\frac{(1-\varepsilon_L)P_N}{\cos\varphi_N} \tag{2.9-44}$$

式（2.9-43）、式（2.9-44）的实质是计算容量应等于电机在能量转换过程中，通过气隙传递的容量，传统的同步电机或异步电机，其额定功率或者是定子输出的电功率，或者是转子轴输出的机械功率，因而可用额定功率 P_N 来表示其计算容量，但对于交流励磁发电机，其能量的出入口有三个：一个是定子的电功率，一个是转子轴上的机械功率，还有一个是转子励磁口的电功率。其能量流程与传统的电机存在着较大的差异，其定、转子方均可输入输出电功率，正是由于此原因，交流励磁发电机又被人们称之为双馈发电机。由第六章分析可知，交流励磁发电机存在一个临界转差率 s_μ。当运行转差不等于 s_μ 时，其励磁口的电功率，有可能是输入电机，也可能是由转子电路回馈给电网，这将取决其运行状态，因此对于交流励磁发电机其计算容量，应根据电机运行状态以及转差率 s 的大小取不同的计算值。

当交流励磁发电机运行于发电状态，且 $s>s_\mu$ 时，其计算容量为

$$P'=\frac{(1-\varepsilon_L)P_N}{\cos\varphi_N}$$

交流励磁发电机运行于电动状态，$s>s_\mu$ 时，其计算容量

$$P'=\frac{(1-\varepsilon_L)P_N}{\eta_N\cos\varphi_N} \tag{2.9-45}$$

当交流励磁发电机运行于发电状态，且 $s<s_\mu$ 时，其计算容量为

$$P'=\frac{(1-\varepsilon_L)P_N}{\cos\varphi_N}(1-s)$$

当交流励磁发电机运行于电动状态，且 $s<s_\mu$ 时，其计算容量为

$$P'=\frac{(1-\varepsilon_L)P_N}{\eta_N\cos\varphi_N}(1-s) \tag{2.9-46}$$

7.3 电磁计算程序

由于交流励磁发电机运行原理与绕线转子异步电机相似，内部的电磁关系也相似，其定、转子绕组的型式以及电路、磁路都完全一样，所以交流励磁发电机的电磁设计可参照绕线转子异步电机的电磁计算程序，对相同部分，如交流励磁发电机的定、转子绕组、参数、磁路计算等可完全借用，而对交流励磁发电机与绕线转子异步电动机不同的地方，如电动势系数、电压调整率、额定励磁电压、额定励磁容量，稳态短路电流等计算，则可根据交流励磁发电机的等效电路、相量图建立计算关系式。

7.3.1 电动势系数

绕线转子异步电机的电动势 $E_1<U_1$，其电动势系数 $1-\varepsilon_L<1$，但交流励磁发电机的电动势系数将随运行点的改变而改变，其值有较大的变化。可按图2.9-16进行分析计算，或参考有关资料计算。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

7.3.2　额定励磁电压计算

额定励磁电压为交流励磁发电机在额定运行时，转子励磁绕组所需的电压，其大小可根据交流励磁发电机的相量图，即电压、电动势、电流的相位关系求得，如图 2.9-16 所示，由于定子电压 $\dot{U}_1$ 与电动势 $-\dot{E}_1$ 相量的夹角一般很小，为简化分析，可按假定 $\dot{U}_1$ 相量与 $-\dot{E}_1$ 相量重合后的相量图计算，或参考有关资料计算。

7.3.3　额定励磁容量的计算

交流励磁发电机的额定励磁容量为

$$S_{fN}=\sqrt{s^2P_N^2+s^2\left[P_N\tan\varphi_1+\frac{(1-\varepsilon_L)^2}{X_m}\right]^2} \tag{2.9-47}$$

7.3.4　稳态短路电流的计算

当交流励磁发电机发生定子三相短路时，相当于传统感应电动机堵转运行，则定子稳态三相短路电流按下式计算

$$I_{1K}=\frac{\frac{U_2'}{s}}{\sqrt{(R_a+R_r')^2+(X_{s\sigma}+X_{r\sigma}')^2}} \tag{2.9-48}$$

7.3.5　电压调整率的计算

交流励磁发电的电压调整率定义与传统同步发电机的电压调整率定义相同，它是在保持励磁和转速不变时，发电机从额定负载到空载时，空载电压 U_0 与额定电压之差占额定电压的百分比

$$\Delta U=\frac{U_0-U_N}{U_N}\times 100\% \tag{2.9-49}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

参 考 文 献

[1] 汤蕴璆，史乃主编. 电机学. 北京：机械工业出版社，1999.

[2] 陈文纯主编. 电机瞬变过程. 北京：机械工业出版社，1983.

[3] 孙玉田. 凸极同步电机的参数计算. 电机与控制学报，1997 (2).

[4] 孙玉田. 电磁场计算中的磁导率. 哈尔滨电工学院学报，1992 (4).

[5] 郭立炜，汤蕴璆. 汽轮发电机的非线性涡流场和运算电抗的数值计算. 哈尔滨电工学院学报，1989 (2).

[6] 赵慎德. ABB空内冷汽轮发电机的技术特点. 国外大电机，1990 (6).

[7] 哈尔滨大电机研究所. 汽轮发电机用材料汇编. 大电机杂志社，1990.

[8] 丁舜年主编. 大型电机的发热与冷却. 北京：科学出版社，1992.

[9] 张为杰. 略谈网机关系及其协调. 国外大电机，1986 (6).

[10] 沈梁伟. 对当前透平型发电机在线监测应用的初步分析和建议. 电力设备，2003，2.

[11] 高严主编. 面向21世纪电力科学技术讲座. 北京：中国电力出版社，2001.

[12] 杨顺昌. 国外对异步化同步发电机的探讨. 国外大电机，1991 (4)：1-7.

[13] (日) E. Kita等. 400MW可调速抽水蓄能系统. 国外大电机，1992 (4).

[14] 梁志翔. 异步化汽轮发电机励磁控制研究. 重庆大学博士学位论文，1995.

[15] 杨顺昌. 异步化汽轮发电机电磁设计特点. 中国电机工程学报，1992，9，12 (5)：8-14.

[16] 杨顺昌，熊家驹. 异步化汽轮发电机转子绕组设计. 东方电机，1995，4：41-46，105.

[17] (日) S. Furuya等. 世界首台用于抽水蓄能电站的变频供电变速发电—电动机的研制和商业运行. 国外大电机，1992 (4).

[18] 廖勇. 交流励磁发电机励磁控制策略及电磁设计的研究. 重庆大学博士学位论文，1997.

[19] 沈梁伟. 国外发电机的新发展及与我们的差距. 国外大电机，2001 (3).

[20] 汪耕主编. 大型汽轮发电机设计、制造与运行. 上海：上海科学技术出版社，2000.

[21] 白延年. 水轮发电机设计与计算. 北京：机械工业出版社，1982.

[22] 武中德，王黎钦，曲大庄，齐毓霖. 大型水轮发电机推力轴承热弹流润滑性能分析. 摩擦学学报，2001，21 (2)：147-150.

[23] 武中德，张宏，王黎钦，曲大庄. 大型水轮发电机弹性金属塑料瓦推力轴承技术. 润滑与密封，2002，(2)：59-62.

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第3篇 感应电机

主编单位：上海电器科学研究所(集团)有限公司
华中科技大学
广州电器科学研究院
主　　编：黄国治　李朗如　吴国平
编写人员：黄国治(上海电器科学研究所(集团)有限公司)
李朗如(华中科技大学)
傅丰礼(上海电器科学研究所(集团)有限公司)
黄　坚(上海电器科学研究所(集团)有限公司)
秦　和(上海电器科学研究所(集团)有限公司)
周理兵(华中科技大学)
马志云(华中科技大学)
张远海(南阳防爆集团有限公司)
阎传宇(南阳防爆集团有限公司)
王云生(南阳防爆电气研究所)
谭玉林(佳木斯防爆电机研究所)
苗　峰(佳木斯防爆电机研究所)
李圣年(上海电器科学研究所(集团)有限公司)
姚秋亮(上海南洋电机有限公司)
杨昭特(广州电器科学研究院)
陈　斌(广州电器科学研究院)
仵均科(西安微电机研究所)

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第1章 概 论

1 感应电机的特征分类和用途

1.1 基本特征

感应电机是应用面最广的一种异步电机，其定子绕组接交流电网，转子绕组不需与其他电源连接。异步电机是泛指负载时的转速与所接电网频率之比不是恒定关系的一种交流电机。在不致引起误解或混淆的情况下，感应电机也可称为异步电机。我国制造业习惯称此类产品为异步电机。

感应电机具有结构简单，制造、使用和维护方便，运行可靠以及重量较轻，成本较低等优点。

感应电动机有较高的运行效率和较好的工作特性，从空载到满载范围内接近恒速运行，能满足大多数工农业生产机械和商用、办公、家用电器的传动要求。感应电机还便于制造成各种防护型式，以适应不同环境条件的需要。

感应电动机运行时，必须从电网吸取无功励磁功率，使电网的功率因数变差，对低转速电机尤其显著。因此，对驱动球磨机、压缩机等大功率、低转速的机械设备，常采用同步电动机。

由于感应电机的转速与其旋转磁场转速有一定的转差关系，与直流电机调速比较而言，其调速性能较差。随着电力电子器件及交流变频调速技术的发展，目前适用于宽调速的交流电动机变频调速系统性能及经济性已可与直流电动机的相媲美。

1.2 主要类型和用途

感应电机主要用作电动机。电力驱动用感应电动机中心高一般从45mm到1000mm，功率范围很广，从10W到10MW以上。适用于各种电源电压及频率供电，包括低压690V及以下（例如单相220V，三相380V等）和高压3kV、6kV、10kV等，以及频率50Hz或60Hz。感应电动机在各种电动机中应用最广、需求量最大，在各种电气传动系统中，有90%左右采用感应电机驱动；在电网总负荷中，感应电机占60%左右。

为适应各种机械设备的配套要求，感应电动机的系列、品种、规格繁多。它可按电源相数、尺寸、功率、转子结构型式、系列产品用途等分类。

按电源相数分通常有单相、三相电机。

按电机尺寸或功率分类，轴中心高为630mm以上的为大型电机；轴中心高在63～630mm范围内的为中小型电机；折算至1500r/min时的最大连续定额不超过1.1kW的称为小功率电机。

按转子绕组结构型式分为笼型感应电机和绕线转子感应电机。

笼型感应电机由置于转子槽中的导条及两端的端环组成闭合回路，整个转子形成一坚实的整体，结构简单牢固。有单笼、深槽单笼和双笼转子结构。从工艺上分有铸铝（或铸铜）笼及焊接铜笼。笼型感应电动机应用最为广泛。

绕线转子感应电机由置于转子槽中的插入式线圈或散嵌线圈、集电环和电刷组成回路，回路中可接入外加电阻。绕线转子感应电动机用于要求起动转矩高、起动电流小，或小范围调速的场合。

2 感应电机基本结构

一般用途三相感应电动机的典型结构如图3.1-1及图3.1-2所示。

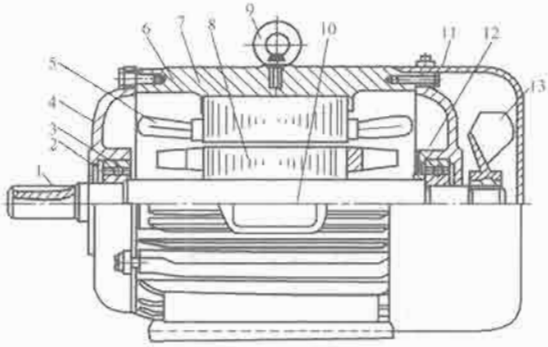


图3.1-1 小型笼型感应电动机（IMB3，IP44，IC411）
1—轴；2—弹簧片；3—轴承；4—端盖；5—定子绕组；6—机座；7—定子铁心；8—转子铁心；9—吊环；10—接线盒；11—风罩；12—轴承内盖；13—风扇

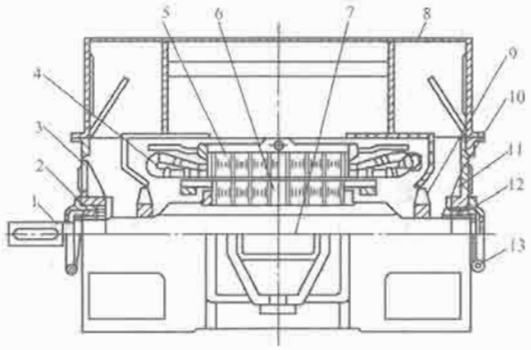


图3.1-2 大中型笼型感应电动机
（IMB3，IP23，IC01）
1—轴；2—轴承；3—端盖；4—定子绕组；5—定子铁心；6—转子铁心；7—接线盒；8—顶罩；9—风扇；10—机座；11—轴承内盖；12—轴承外盖；13—排油器

小型铸铝笼型感应电动机主要零部件示例如图3.1-3所



图3.1-3 小型铸铝笼型感应电动机主要零部件

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

示，大中型绕线转子感应电动机主要零部件示例如图 3.1-4 所示。

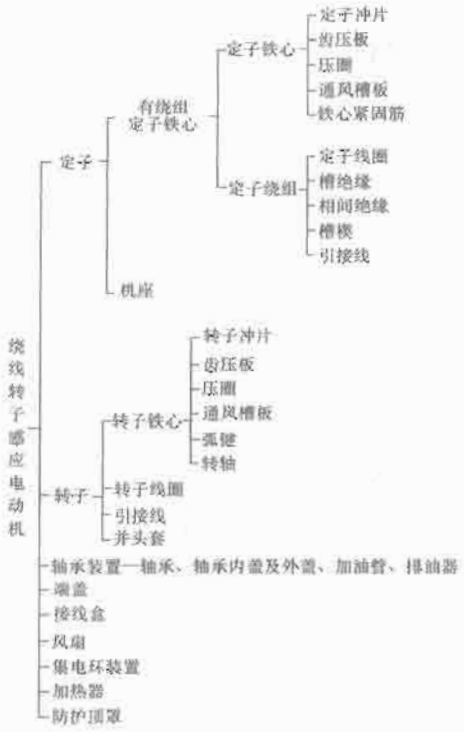


图 3.1-4 大中型绕线转子感应电动机主要零部件

3 感应电动机的技术指标

3.1 效率和功率因数

电动机效率是指电动机输出机械功率与输入电功率之比，通常用百分数表示。功率因数为电动机输入有功功率与视在功率之比。它们是电动机最重要的技术经济指标之一。

效率直接影响电动机有效材料用量和运行费用。较高的运行效率可以为用户带来显著的节能效果，但电动机的有效材料用量增加，成本及售价将要提高。同时，较高的效率能否充分发挥作用还与电动机的年运行时间和运行时负载率有关。

当一台电动机在额定负载下的效率由 η_2 提高到 η_1 时，该电动机运行一年所节省的电能 w_s(kW·h)为

$$w_s = P_N L_F\% T_h \left(\frac{100}{\eta_2} - \frac{100}{\eta_1}\right)$$

式中，P_N为电动机额定功率，kW；$L_F\%$ 为电动机运行负载率；T_h 为年运行时间，h。因而电动机年运行时间越长，运行负载率越高，提高效率后的节能效果越显著。

低压感应电动机运行负载率一般在 50%～80%之间，大多在 60%～70%范围内。电动机效率在不同负载率时的变化与电动机可变损耗(定子和转子绕组铜损耗及负载附加损耗)和不变损耗(铁损耗和风摩损耗)的分配比例有关，在总损耗中，可变损耗增大，不变损耗减少，最高效率出现越趋近于低负载率区。电动机在比较宽的负载率范围内有比较平坦的效率特性，有利于电动机在相对较低的负载率下仍有较高的效率。

3.2 起动性能分级

电动机起动包括电动机接入电源从转子处于静止状态直至达到额定转速的全过程。电动机应具有足够大的堵转转矩和最小转矩，以带动负载机械很快地起动，并达到额定转速而正常工作；同时应具有足够的最大转矩，以保证其有一定的过载能力。而对于堵转电流(或堵转视在功率)，应加以限制，以免供电电源产生过大的电压降而影响接在同一电源上的其他电气设备的正常运行。此外，起动电流过大，将导致电动机绕组过热和受到过大的电磁力冲击。

行业标准 JB/T 8158《电压为 690V 及以下单速三相笼型感应电动机的起动性能》(等同 IEC 60034-12)，对电动机起动性能规定了四种设计：正常转矩的 N 设计、NY 设计及高转矩的 H 设计、HY 设计。其中 N 设计及 H 设计电动机采用直接起动，NY 设计及 HY 设计电动机采用星-三角起动。

标准中对上述四种设计规定了起动转矩、堵转视在功率及起动要求。起动转矩由堵转转矩 T_1、最小转矩 T_u和最大转矩 T_b表示，每一转矩均用额定转矩 T_N的标么值表示。

堵转视在功率 S_I为输入的视在功率，用额定功率 P_N的标么值表示。

起动要求规定电动机允许在冷态下连续起动两次(两次起动之间电动机应自然停机)，或在额定运行后在热态下起动一次。并规定所带动的负载的转动惯量值。

3.3 噪声振动水平分析

电动机的噪声振动水平是反映电动机设计、制造工艺、装配质量和轴承质量的一个综合指标，而且是衡量环境质量的重要指标，对电动机噪声振动的要求将会越来越严格。

国标 GB 10068—2000《轴中心高为 56mm 及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值》(等同 IEC 60034-14 第 2 版 1996)，将电机振动划分为三种振动等级：N(常规级)、R(降低级)和 S(特殊级)。其规定范围如下：

轴中心高为 56mm 及以上，50MW 以下的单台空载运行的电机。

转速范围限于 600～3600r/min。

这个范围电机的最大振动烈度值(振动速度有效值)都不能超过 N 等级的规定。

国标 GB 10069—2006《旋转电机噪声测定方法及限值》(等同 IEC 60034-9 第 3 版 1997)，除对输出功率为 1～5500kW(或 kVA)额定转速小于等于 3750r/min 电机规定空载 A 计权声功率级限值以外，还对额定输出功率不低于 1kW 且不超过 400kW 的 50Hz 或 60Hz 单速三相笼型感应电动机规定了较严格的空载 A 计权声功率级限值，以及额定负载下超过空载的 A 计权声功率级允许最大增加量，即规定了考核负载噪声的要求。

通常满载时的声功率级比空载时的高，如果以空气动力噪声为主则变化较小，而以电磁声为主则变化就较显著。

该限值不考虑旋转方向，风扇为单向旋转的电机通常比双向的噪声低。这种影响对高速电机更为突出，对此可设计为仅单向运行。

3.4 定子绕组温升限值

根据国标 GB 755—2000《旋转电机 定额和性能》(等同 IEC 60034-1 第 10 版)，空气间接冷却绕组的温升限值，电动机定子绕组采用 B 级绝缘，在基准运行条件下按电阻法测得的电动机定子绕组温升按 80K 考核；电动机定子绕组采用 F 级绝缘，在基准运行条件下按电阻法测得的电动机定子绕组温升按 105K 考核。对额定输出小于 600W(或 VA)电机的交流绕组和无扇自冷式电机的交流绕组，温升限值可相应增加 5K，即 B 级绝缘和 F 级绝缘定子绕组温升分别按

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

85K 和 110K 考核。

4 感应电机产品发展概况及产品类别

我国在 20 世纪 80 年代初期开始对中小型感应电动机基本系列和一些主要派生、专用系列进行了产品更新，发展了 Y 系列小型感应电动机及 YR 绕线转子、YD 变极多速、YH 高转差率、YCT 电磁调速、YCJ 齿轮减速、YEJ 电磁制动、YZC 低振动低噪声、YB 隔爆型、YA 增安型等 18 个派生系列电动机，YZ、YZR 起重冶金用电动机及 YQS2 井用潜水电机等专用系列，以及 Y、YR 中型及大型高压感应电动机系列。同时注重专用产品的发展，先后更新或开发了风机专用变极多速电机、辊道用电机、电动阀门用电机、电梯用电机、振动电机、抽油机电机等系列产品。逐步改变了我国中小型电机产品品种少、产品结构不尽合理的状况。

进入 20 世纪 90 年代以来，为使我国中小型电机赶上国外同类产品先进水平，总结国内自 80 年代初以来 Y 系列电动机稳定生产及改进、提高的经验，应用了我国在电机振动噪声控制、计算机辅助设计、绝缘结构、机械结构设计、工艺、材料、测试等领域的技术成果，吸收国外同类产品更新的先进技术，开发设计了 Y2 系列三相感应电动机。同时相继开发了 YB2 隔爆感应电动机和 YZR2 起重冶金用感应电动机。随后在高压电机方面也开发了 Y2 系列中型高压三相感应电动机，该系列电动机为机座带散热片结构的全封闭外扇冷高压电机。为适应各种环境条件的使用要求，陆续开发了带空-空冷却器和空-水冷却器的高压电动机及气候防护式高压电动机。随着变频调速技术在各行各业中的应用越来越广泛，在 Y2 系列电机基础上开发了 YVF2 变频调速专用三相感应电动机系列。

长期以来我国小型电动机铁心都采用热轧硅钢片，从环保和国家产业政策出发已限期淘汰热轧硅钢片，推广采用冷轧硅钢片是技术发展的趋势。同时从节约能源、保护环境出发，开发高效感应电动机是产品发展的趋势，21 世纪初已陆续开发采用冷轧硅钢片的感应电动机系列和高效率感应电动机系列产品。

主要系列产品的类别及其特点、应用见表 3.1-1。

表 3.1-1 主要系列产品的类别及其特点、应用

系列		性能或结构特点	应用
一般用途感应电动机（基本系列电机）		适用一般传动要求，使用面广的系列产品	驱动水泵、风机、压缩机、机床等一般机械设备
电气派生系列	高效电动机	降低电机运行损耗，提高效率	驱动长期连续高负载率运行的设备，如纺织机械及年运行时间长的机械设备
	高转差率电动机	较高的转差率、较高的起动转矩、较低的起动电流和较软的机械特性	驱动转动惯量大且具有冲击性负载的机械，如剪床、压力机、锻压机
	多速电动机	改变定子绕组接线方法以改变极对数，得到多种转速	驱动要求有级变速的设备
	变频调速电动机	适应变频器供电的要求，通过调节变频器频率，以改变电动机供电频率而调速	驱动要求无级调速的机械设备
结构派生系列	电磁调速电动机	由感应电动机和电磁转差离合器组成，通过调节离合器的励磁电流而调速	驱动恒转矩或风机型负载要求无级调速的设备
	齿轮减速电动机	由感应电动机和圆柱齿轮减速机组成	驱动低速大转矩的机械设备
	电磁制动电动机	由感应电动机和电磁制动器组成，电动机定子断电时，转子迅速被制动停转	驱动要求快速准确停机的设备，如升降运输机械、输送机械
	低振动、低噪声电动机	提高转子动平衡精度及关键部位加工精度，降低电动机振动噪声	驱动精密机床设备及要求低噪声的设备
特殊环境派生系列	户外防腐蚀电动机	防护等级为 IP54 或 IP55，结构、材料、工艺采用防腐蚀措施及密封措施	用于有腐蚀性气体或粉尘的户内、户外场所
	隔爆型电动机	加强外壳机械强度，并严格保证各接合面上具有一定的间隙参数	用于石油、化工、煤矿井下有爆炸危险的场所
	增安型电动机	正常运行不产生火花、电弧或危险温度，并提高其防爆安全型	用于仅在不正常情况下才能形成爆炸性混合物的场所
	船用电动机	加强外壳机械强度，绝缘处理能防凝露、盐雾及霉菌的侵蚀	驱动船舶上一般机械设备
专用系列	辊道用电动机	高起动转矩，能频繁起动及正反转	驱动轧钢辊道
	电梯电动机	短时工作制的变频调速电动机或变极双速电动机	驱动电梯
	力矩电动机	机械特性软，能在堵转到接近同步转速范围内稳定运行	驱动恒张力、恒线速（卷绕）和恒转矩（导辊）的机械
	电动阀门用电动机	短时工作制，高起动转矩及低转动惯量，电动机与阀门组成一体	用于自动开闭输油、输气管线上的阀门
	起重及冶金用电动机	继续定额，起动转矩较高，并能频繁起动，过载能力大	驱动冶金辅助设备及一般起重机械
	振动电动机	电动机带偏心块，使其本身整体产生振动	传送带上物料传输及用作建筑机械
	木工电动机	转动惯量小，且过载能力大	驱动各种木工机械
	井用潜水电动机	外形细长，内腔充水或充油密封，与潜水泵配套组成潜水电泵	潜入井下供灌溉提水用
	浅水潜水电动机	电动机内腔充水、充油或干式，与潜水泵配套组成一体	潜入 0.5～3m 浅水中提水，用于农田、城市建设
	井用潜油电动机	电动机细长，内腔充油密封，与深井油泵配套组成潜油电泵	潜入油井中直接提油

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

5 感应电机发展趋势

感应电动机作为驱动各种机械设备和办公、家用电器的动力，广泛用于工业、农业、交通以及商业、家用等各个领域，提高产品的品质、性能和技术经济指标有很大意义。感应电机的发展趋势综述如下：

(1) 发展和更新产品

不断采用新技术、新设计、新材料和新工艺，适时地发展和更新产品。同时应根据不同配套设备的运行特性要求、运行状况及环境条件，大力发展派生、专用系列电机，并逐步扩大其在电机总产量中的比重，以获得最佳的综合技术经济效益。

(2) 提高能效效益

从节约能源，减少大气中二氧化碳气体排放以保护环境出发，开发和采用高效率感应电动机是目前国际发展趋势。

美国率先制定能源政策法令（即 EPACT 指令），规定在美国生产和从国外进口到美国的电动机必须是高效率电机。随后美国电机制造商协会（NEMA）制定了超高效率电机的能效标准。欧盟的电动机能效标准（CEMEP）将电动机的效率分为 eff1、eff2、eff3 三级，eff1 级的效率为最高。我国对中小型三相感应电动机制定了能效标准，该标准将效率分为 1、2、3 三个能效等级，1 级效率最高，3 级为能效限定值，系强制性标准条款。澳大利亚、日本、巴西、印度等国也相继制定电动机能效分级。

国际电工委员会（IEC）最近发布新工作项目建议，鉴于笼型感应电动机国际上现有许多不同的能效分级，给制造厂设计供全球市场的电动机增加困难，IEC 将着手制定单速三相笼型感应电动机能效分级国际标准。标准的制定将协调不同的要求，以使每一效率等级的电动机设计能适应 50Hz 和 60Hz 电源的全球市场，这还能减少客户对不同国家有不同效率要求而产生的混淆。

开展提高电动机效率的设计、工艺措施研究。例如，采用高导磁低损耗磁性材料，低谐波含量绕组，降低电机通风损耗、杂散损耗，以提高效率为目标的优化设计，提高电机铁心冲剪及转子铸铝工艺水平等措施。提高电动机效率，并扩大电机经济运行区，使电机在较宽的负载范围内具有较高的运行效率，以获得最佳的节能效果。

(3) 降低电机的振动噪声

环境条件对电机振动噪声要求越来越严格。按 IEC 国际标准最新版本的规定，对电机振动，除要求考核振动速度外，还要求考核振动加速度和位移。对电机噪声，要求考核电机空载噪声和负载噪声。

振动噪声指标已成为衡量电机产品品质的重要技术指标。要求在设计阶段预估电机噪声，并在设计、工艺上采取措施控制及降低电机振动噪声。

(4) 发展机电一体化产品

随着电力电子器件的发展及交流调速技术的进步，交流调速传动已达到与直流调速传动基本相同的调速性能。电动机与调速控制装置成套，甚至装成一体的机电一体化产品，已有很大发展，成为电气传动的发展趋势。

交流电机变频调速以其体积小、重量轻、精度高、功能强、可靠性高等优于以往的任何调速方式，如变极调速、调压调速、转差调速、串级调速，乃至直流调速，因而在钢铁、冶金、石化、纺织、化纤、机械、建材、造纸等各行各业以及交通、城市供水、污水处理、中央空调等都越来越得到普遍应用。变频调速技术已成为节能和提高产品质量的有效措施。

变频器大量使用的是 400V 以下低压及 315kW 以下较小容量产品，主要采用压频控制。目前 3000V、6000V 高压和 500kW 以上大容量变频器技术业已成熟，矢量控制、直接转矩控制等功能先进的产品也已广泛应用。

(5) 提高电机运行可靠性

为提高电机运行可靠性，一般用途电动机普遍采用 F 级绝缘结构而温升按 B 级考核，加强电机绕组匝间绝缘。高压电机绕组采用真空压力浸渍工艺。铜笼转子采用中频整体焊接，减少导条与槽间隙，并使导条在槽内楔紧。

(6) 采用计算机辅助设计及制造集成系统

电机设计广泛采用计算机辅助设计，包含电磁、机械、通风温升、振动噪声等各项设计分析软件，采用优化设计和专家系统。同时显示和绘制电机总体结构及零部件图，建立材料、产品设计和图样工程数据库。研究更准确的产品数学模型，应用仿真技术在设计阶段模拟产品性能，并获得最优的设计。

同时根据产品几何模型和加工要求，产生重要零部件加工的数控程序指令，建立完整的计算机辅助设计制造系统，以不断提高电机生产效率。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 2 章　感应电机工作原理

1　气隙旋转磁场和感应电动势

1.1　感应电机运行的基本原理

顾名思义，感应电机运行的基本原理是基于电机定子与转子之间的电磁感应作用。通常感应电机为三相，除了特殊情况，例如变极绕组外，一般情况下，定子的三相绕组有两种接法：星形与三角形。

当定子三相绕组外施三相对称电压时，绕组内流过三相对称电流，将产生旋转磁动势（参见第 1 篇第 2 章第 4 节），建立起一系列旋转磁场，其中穿过气隙到达转子的基波磁场起主要作用，称为主磁场。此外，三相定子电流还产生仅与定子绕组交链而未到达转子的磁场，称为漏磁场。气隙基波旋转磁场不仅在定子绕组内感应电动势，当气隙基波旋转磁场与转子有相对运动时，将切割转子绕组导体而感应电动势，一般转子绕组为对称多相绕组，且为短路状态，则感应电动势在转子绕组内产生对称多相电流。一方面，转子绕组电流在转子上产生旋转磁动势，当定子基波磁动势与转子基波磁动势相对静止时，它们叠加为合成磁动势，建立气隙基波旋转磁场。因此，感应电机工作时的气隙基波磁场是由定、转子磁动势共同联合建立。另一方面，转子绕组的电流与气隙磁场相互作用产生电磁力（F_e）而形成电磁转矩（T_{em}），电磁转矩克服转轴上的负载阻转矩（T_c）输出机械功。此时，定子输入电功率，感应电机实现了机电能量的转换，此即感应电动机运行的基本原理。由此可见，要感应电机的转子与气隙磁场实现电磁相互作用，电机能正常工作，必须满足两个基本条件：一是电机的定、转子基波磁动势必须能合成并在气隙内建立旋转磁场；二是转子转速不能等于气隙磁场的转速，两者之间必须保持一个差值。

气隙基波旋转磁场也就是主磁场的旋转速度，又称同步转速，与电源频率的关系为

$$n_s = \frac{60 f_1}{p} \tag{3.2-1}$$

式中，n_s为同步转速，r/min；f_1为定子电源频率，Hz；p为定子绕组的极对数。

令转子的转速为 n，将转子转速与同步转速之差对同步转速之比定义为转差率，以 s 表示

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \tag{3.2-2a}$$

即有

$$n = (1 - s) n_s \tag{3.2-2b}$$

转差率在分析感应电机运行行为时是一个常用的重要物理量。感应电机在作电动机运行时，转子的转速小于同步转速，转向相同，即 $0<n<n_s$，因此有 $0<s<1$。

根据电机的可逆原理，如果电机的定子接在电网上，用原动机拖动转子顺旋转磁场方向旋转并使其转速大于同步转速，即 $n>n_s$，$s<0$，对比电动机状态，此时转子绕组导体的感应电动势以及由此产生的电流反向，电流与气隙磁场相互作用产生电磁力而形成的电磁转矩也反向，对原动机的拖动转矩（T_1）而言是制动性质。此时，电机的定子电流的励磁分量仍由电网供给，但有功分量反向，定子输出电功率，转子输入机械功率，电机运行在发电机状态。

如果由外转矩（T_1）拖动转子向旋转磁场的反方向旋转，即 $n<0$，$s>1$，定子仍接在电网上，此时，电磁转矩对于外转矩是制动性质的，电机运行在电磁制动状态，定子输入电功率，转子输入机械功率，两者均变为电机内的热能耗散掉，用于起重机的三相感应电机下放重物时即运行在此种状态。图 3.2-1 所示为三种运行状态的物理示意图。

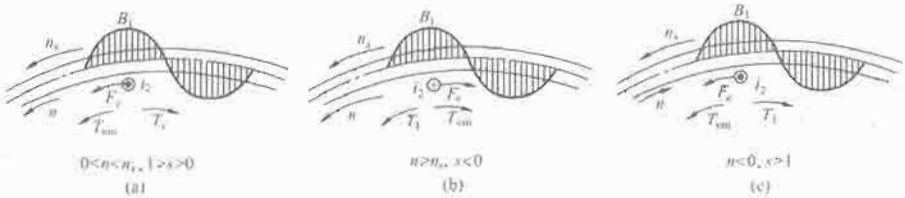


图 3.2-1　感应电机的三种运行状态的物理示意
（a）电动机；（b）发电机；（c）电磁制动

1.2　磁动势与气隙磁场

由定子多相对称电流和定子对称多相绕组建立旋转磁动势，每极基波旋转磁动势幅值为

$$F_1 = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \frac{N_1 K_{dp1}}{p} I_1 \tag{3.2-3}$$

式中，m_1为定子绕组相数，对于三相电机，$m_1=3$；K_{dp1}为定子基波绕组系数；N_1为定子绕组每相串联匝数；I_1为定子相电流有效值，A。

由转子多相绕组和电流建立的每极基波旋转磁动势幅值为

$$F_2 = \frac{m_2 \sqrt{2}}{\pi} \frac{N_2 K_{dp2}}{p_2} I_2 \tag{3.2-4}$$

式中，m_2为转子绕组相数，对于绕线转子，$m_2=3$；p_2为转子的极对数；N_2为转子绕组每相串联匝数；K_{dp2}为转子基波绕组系数；I_2为转子相电流有效值，A。

必须指出，为了获得稳定的平均电磁转矩，旋转电机转子的极对数必须等于定子的极对数，即 $p_2=p$。当转子静止时，感应电机转子绕组电流的频率为 f_1，转子基波磁动势的转速即为 n_s；同时由于气隙磁场切割转子绕组的相序与定子绕组的相序相同，转子磁动势的转向与定子磁动势同向，这样，两个空间正弦波（行波）同步同向旋转，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

即保持相对静止。当转子旋转时，以电动机运行状态为例，转子的转速小于同步转速，即 $n<n_s$，且转子的转向与定子基波磁动势亦即气隙磁场的转向相同，转子对气隙磁场的相对转速为 $n_2=n_s-n$，则转子绕组内感应电动势和电流的频率为

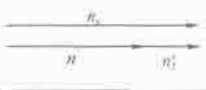
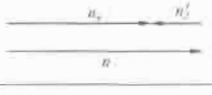
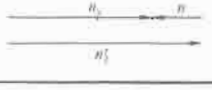
$$f_2=\frac{pn_2}{60}=\frac{pn_s}{60}\left(\frac{n_s-n}{n_s}\right)=f_1 s \qquad (3.2\text{-}5)$$

转子基波磁动势对转子本身的转速，即在转子观察到转子基波磁动势的转速为

$$n_2'=\frac{f_2 60}{p}=\frac{sf_1 60}{p}=\omega_s=n_s-n=n_2$$

由于 $n<n_s$，转子绕组切割气隙磁场的相序与定子绕组相序相同，因此，转子基波磁动势的转向与定子基波磁动势的转向相同，而转子以转速 n 与气隙磁场同向旋转，则在定子上观察转子基波磁动势的转速为 $n_2'+n=n_s-n+n=n_s$，也就是说，转子基波磁动势与定子基波磁动势同步同向旋转，两者在空间保持相对静止。对于感应电机三种运行状态定、转子基波磁动势的相对关系汇集见表 3.2-1。

表 3.2-1 定、转子基波磁动势的相对关系

电机状态	转子转速大小	转子转向	F_2 对 F_1 的转向	F_2 对 F_1 的相对转速	相对转速图例
电动机	$n<n_s$	$n>0$	同向 $n_2'>0$	$n_2'+n=n_s-n+n=n_s$	
发电机	$n>n_s$	$n>0$	反向 $n_2'<0$	$-n_2'+n=-n+n_s+n=n_s$	
电磁制动	$n<n_s$	$n<0$	同向 $n_2'>0$	$n_2'-n=n_s+n-n=n_s$	

由此可见，感应电机在任何运行状态的任意转速下，定子基波磁动势与转子基波磁动势在空间均保持相对静止，两个正弦波叠加或用空间矢量叠加为合成磁动势 $\boldsymbol{F}_m$，即有

$$\boldsymbol{F}_1+\boldsymbol{F}_2=\boldsymbol{F}_m$$

$$\frac{m_1\sqrt{2}}{\pi}\frac{N_1K_{dp1}}{p}\dot{I}_1+\frac{m_2\sqrt{2}}{\pi}\frac{N_2K_{dp2}}{p}\dot{I}_2=\frac{m_1\sqrt{2}}{\pi}\frac{N_1K_{dp1}}{p}\dot{I}_m \qquad (3.2\text{-}6)$$

式中，$\dot{I}_m$ 为定子电流的励磁分量有效值，A。

上式即为感应电机运行时的磁动势平衡方程。励磁磁动势的大小为

$$F_m=\frac{m_1\sqrt{2}}{\pi}\frac{N_1K_{dp1}}{p}I_m$$

假如对有槽电机的定、转子作光滑性处理以及对磁路饱和作近似处理，由合成磁动势在气隙中产生的基波旋转磁场为

$$B_1(\theta,t)=F_m\Lambda_\delta\sin(\omega t-p\theta)$$

式中，$B_1(\theta,t)$ 为基波磁场；ω 为定子电流的角频率，$\omega=2\pi f_1$；θ 为以相绕组轴线为参考的空间机械角度；Λ_δ 为理想化处理后的气隙磁导，可表示为

$$\Lambda_\delta=\frac{\mu_0}{k_\delta k_s\delta}$$

式中，μ_0 为真空磁导率，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m；k_δ 为气隙系数又称卡氏系数；k_s 为磁路饱和系数；δ 为定、转子之间的气隙长度。

气隙磁通密度最大值为

$$B_\delta=\frac{\mu_0}{k_\delta k_s\delta}F_m \qquad (3.2\text{-}7)$$

基波旋转磁场的磁通量即主磁通为

$$\Phi_m=\frac{2}{\pi}\tau l_{ef}B_\delta \qquad (3.2\text{-}8)$$

式中，τ 为极距；l_{ef} 为铁心有效长度。

1.3 感应电动势

由定子和转子合成磁动势在气隙内建立转速为同步转速 n_s 的基波旋转磁场，它同时切割定子与转子绕组并感应电动势，定子感应电动势的频率为 f_1，转子感应电动势的频率为 $f_2=sf_1$，则定子与转子的绕组感应电动势有效值（相值）分别为

$$E_1=4.44f_1N_1K_{dp1}\Phi_m \qquad (3.2\text{-}9)$$

$$E_{2s}=4.44sf_1N_2K_{dp2}\Phi_m \qquad (3.2\text{-}10)$$

如果转子静止，则转子感应电动势的频率为 f_1，此时转子感应电动势表示为

$$E_2=4.44f_1N_2K_{dp2}\Phi_m \qquad (3.2\text{-}11)$$

于是，转子旋转与静止时感应电动势的关系有

$$E_{2s}=sE_2 \qquad (3.2\text{-}12)$$

1.4 转子物理量的折算

感应电机的定子回路与转子回路之间没有直接电的联系，能量转换是通过气隙磁场耦合实现的，定子与转子绕组的结构数据不一定相同，如线圈匝数不同，分布情况也各异；在一定转差率下，定、转子回路电气参数的频率也不同，当采用“路”的方法进行定量分析计算时，会带来诸多不便。为此，无论用电路方程或是等效电路，或是相量图方法，如无特殊情况，通常将转子侧的物理量折算到定子侧，会给分析计算带来很大方便。

由式（3.2-9）与式（3.2-11）可定义定子与转子的电动势比即电压折算系数为

$$k_e=\frac{N_1K_{dp1}}{N_2K_{dp2}} \qquad (3.2\text{-}13)$$

如果考虑到定子或转子斜槽对电动势的影响，则电动势比可表示为

$$k_e=\frac{N_1K_{dp1}}{N_2K_{dp2}k_{sk}} \qquad (3.2\text{-}14)$$

式中，k_{sk} 为转子斜槽系数，可表示为

$$k_{sk}=\frac{\sin\left(\frac{b_{sk}}{\tau}\frac{\pi}{2}\right)}{\frac{b_{sk}}{\tau}\frac{\pi}{2}}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式中，b_{sk}为斜槽距；τ为极距。定义电流比即电流折算系数为

$$k_i = \frac{m_1 N_1 K_{dp1}}{m_2 N_2 K_{dp2} k_{sk}} \tag{3.2-15}$$

阻抗比（阻抗折算系数）定义为

$$k_z = k_e k_i = \frac{m_1}{m_2}\left(\frac{N_1 K_{dp1}}{N_2 K_{dp2} k_{sk}}\right)^2 \tag{3.2-16}$$

在上述各式中，对于槽数为Q_2的笼型转子，可以等效地视为：$k_{dp2}=1$；$N_2=1/2$；$m_2=Q_2$；$I_2=I_B$（转子导条电流）。

在感应电机的运算中采用折算方法，包含两方面的意义：频率折算和绕组折算。频率折算是在保持定子与转子之间的能量关系和转子对定子作用不变的条件下，用一个等效静止不动的转子代替实际旋转的转子，即将转子回路中电气物理量如电动势、电流和电抗等的转差频率折算为定子频率。事实上，当研究正弦基波情况下，应用复数运算时，由欧拉公式可知，定子电压方程包含有一个$e^{j\omega t}$因子，而转子电压方程则包含一个$e^{j s\omega t}$因子，频率折算就是将转子电压方程乘以因子

$$\frac{1}{s}e^{j\omega(1-s)t}$$

频率折算前、后转子参数关系见表 3.2-2。

表 3.2-2　　频率折算前、后的转子参数

转子参数	折算前	折算后
电气参数频率	$f_{2s}=sf_1$	f_1
电动势大小	$E_{2s}=sE_2$	E_2
电　流	I_2	I_2
漏电抗	$X_{2s}=sX_2$	X_2
电　阻	R_2	R_2/s

绕组折算就是用一个与定子绕组相数、匝数和分布情况相同的等效绕组代替实际的转子绕组，折算前后转子的各物理量关系见表 3.2-3。

表 3.2-3　　绕组折算前、后的转子参数

转子参数	折算前	折算后
电动势	E_2	$E_2'=k_eE_2$
电　流	I_2	$I_2'=I_2/k_i$
漏电抗	X_2	$X_2'=k_zX_2$
电　阻	R_2	$R_2'=k_zR_2$

1.5　基本方程组

当将转子侧折算到定子侧时，用折算值表示的感应电机（相值）复数形式基本方程为

$$\left.\begin{aligned}
\dot U_1 &= -\dot E_1 + \dot I_1 Z_1\\
\dot E_2' &= \dot I_2' Z_2' + \dot I_2'\left(\frac{1-s}{s}\right)R_2'\\
\dot I_1 &+ \dot I_2' = \dot I_m\\
\dot E_1 &= \dot E_2' = -\dot I_m Z_m
\end{aligned}\right\} \tag{3.2-17}$$

式中，$\dot U_1$、$\dot I_1$、$\dot E_1$分别为定子绕组相电压、相电流和相电动势的复量；Z_1为定子一相绕组的漏阻抗，$Z_1=R_1+jX_1$，这里，R_1、X_1分别为定子一相绕组的电阻和漏电抗；Z_2'为折算后的转子阻抗，$Z_2'=R_2'+jX_2'$；Z_m定子绕组的励磁阻抗，$Z_m=R_m+jX_m$，这里，R_m表征电机铁心损耗的电阻，当转差率较小时，只考虑定子铁心损耗，X_m表征由主磁通引起的励磁电抗。

对于磁路不饱和的电机，利用前述式（3.2-6）～式（3.2-9），不难获得励磁电抗的表达式为

$$X_m = 4f\mu_0\frac{(N_1K_{dp1})^2}{p}\frac{m_1}{\pi}\frac{\tau l_{ef}}{k_\delta\delta} \tag{3.2-18}$$

2　等效电路和相量图

2.1　T 形等效电路

由方程式（3.2-17）可以解得定子电压、电流以及电机参数之间的关系为

$$\dot I_1' = \frac{\dot U_1}{Z_1 + \dfrac{1}{\dfrac{1}{Z_m}+\dfrac{1}{Z_2'+\left(\dfrac{1-s}{s}\right)R_2'}}} \tag{3.2-19}$$

与式（3.2-19）相对应的 T 形等效电路如图 3.2-2 所示。由于采用电路方法模拟旋转电机，电路中电阻的损耗代表消耗的有功功率，电阻$[(1-s)/s]R_2'$与转差率有关，它模拟电机的机械功率。

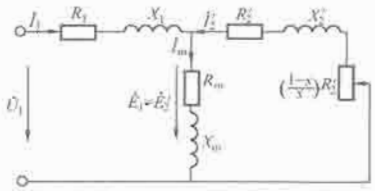


图 3.2-2　T 形等效电路

2.2　L 形等效电路

由 T 形等效电路有如下关系

$$\left.\begin{aligned}
\dot U_1 - \dot I_1 Z_1 &= I_m Z_m\\
\dot I_m Z_m &= (-\dot I_2')\left(Z_2' + \frac{1-s}{s}R_2'\right)\\
\dot I_1 &= \dot I_m - \dot I_2'
\end{aligned}\right\}$$

由此可得

$$\begin{aligned}
\dot I_1 &= \frac{\dot U_1}{\dot\sigma_1 Z_m} + \frac{\dot U_1}{\dot\sigma_1 Z_1 + \dot\sigma_1^2 Z_2' + \left(\dfrac{1-s}{s}\right)\dot\sigma_1^2 R_2'}\\
&= \dot I_0 - \dot I_2''
\end{aligned} \tag{3.2-20}$$

式中，$\dot\sigma_1$为一复量系数，$\dot\sigma_1=1+Z_1/Z_m$；$\dot I_0$为感应电机的理想空载励磁电流，也就是转子同步旋转时的定子电流，$\dot I_0=\dot U_1/(\dot\sigma_1 Z_m)$；$\dot I_2''$为励磁支路移前时的负载支路电流，$\dot I_2''=\dot I'/\dot\sigma_1$。

由式（3.2-20）可得到励磁支路移到定子端电压的等效电路，如图 3.2-3 所示，称为准确励磁支路移前等效电路。实际计算中，考虑到$R_1 \ll X_1$、$R_m \ll X_m$，如果将复数$\dot\sigma_1$取为实数$\sigma_1 \approx 1+X_1/X_m$，则得到较简化的励磁支路移前等效电路，进一步，若取$\sigma_1 \approx 1$，则到简化等效电路。这些等效电路从其线路形状看可称为 L 形等效电路。

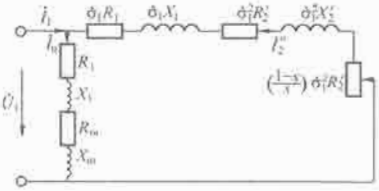


图 3.2-3　L 形等效电路

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.3 相量图

由式（2.3-17）可得出感应电机的相量图，如图 3.2-4 所示。图中 φ_1 表示定子侧电流与端电压之间的相位角，即功率因数角，ψ_2 表示转子侧的内功率因数角，Φ_m 表示主磁通。

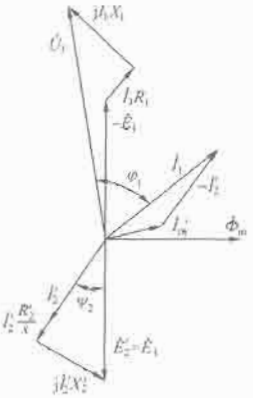


图 3.2-4 感应电动机的相量图

基本方程组、等效电路和相量图是分析计算感应电机各电磁物理量关系的三种不同表述方法，其中，基本方程组定量描述了感应电机各电磁物理量的关系，是三者的基础。

3 能量转换

3.1 功率损耗

感应电动机在运行中产生下列损耗：

1）定子绕组的电阻损耗又称定子铜损耗 P_{Cu1}。

2）转子绕组的电阻损耗又称转子铜损耗 P_{Cu2}。

3）铁心损耗 P_{Fe}，在转差很小时，只考虑定子铁心损耗。

4）通风及机械摩擦损耗，简称为风摩损耗 P_{fv}。

5）附加损耗，又称为杂散损耗 P_s。

3.2 功率关系

由基本方程组或等效电路或相量图，可以确定感应电动机的功率关系，采用相量的点乘积（也可以采用复数运算法），由式（3.2-17）可得到如下关系

$$m_1\dot{U}_1\dot{I}_1 = m_1(-\dot{E}_1\dot{I}_1) + (\dot{I}_1 Z_1)\dot{I}_1$$

$$m_1 U_1 I_1\cos\varphi_1 = m_1 I_m^2 R_m + m_1 I_1^2 R_1 + m_1\dot{E}_1\dot{I}'_2$$

即有

输入功率＝铁损耗＋定子电阻损耗＋
由气隙磁场传递给转子的功率

由气隙磁场传递给转子的功率称为电磁功率 P_{em}，可表示为

$$m_1\dot{E}_1\dot{I}'_2 = m_1\dot{E}'_2\dot{I}'_2 = m_1 I'^2_2 R'_2 + m_1 I'^2_2\left(\frac{1-s}{s}\right)R'_2$$

即有

电磁功率＝转子电阻损耗＋总机械功率

总机械功率 P_{mec} 即是驱动转子旋转的功率，在电路中用一随转差率而变的可变电阻 $(1-s)R'_2/s$ 模拟，由此有

$$P_{em} = m_1 I'^2_2\frac{R'_2}{s} = \frac{P_{Cu2}}{s} \tag{3.2-21}$$

或写成

$$P_{Cu2} = sP_{em} \tag{3.2-22}$$

又有

$$P_{mec} = (1-s)P_{em} \tag{3.2-23}$$

从总机械功率 P_{mec} 中扣除风摩耗 P_{fv} 和附加损耗 P_s，就是电动机轴端输出的有效机械功率 P_2。电动机运行时有如下功率关系

$$P_1 - P_{Fe} - P_{Cu1} = P_{em} \tag{3.2-24}$$

$$P_{em} - P_{Cu2} = P_{mec} \tag{3.2-25}$$

$$P_{mec} - P_{fv} - P_s = P_2 \tag{3.2-26}$$

上述功率关系流程图如图 3.2-5 所示。

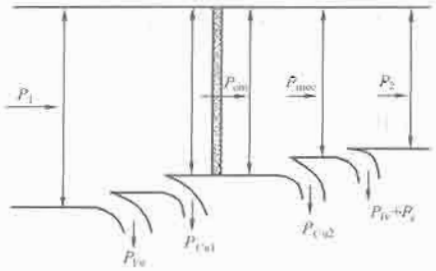


图 3.2-5 感应电动机的功率流程

4 转矩特性

4.1 转矩与功率的关系

由各种功率关系可以得到电机的转矩关系，平均电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} \tag{3.2-27}$$

式中，Ω_s 为旋转磁场的同步机械角速度，可表示为

$$\Omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \tag{3.2-28}$$

由式（3.2-23）可得平均电磁转矩的另一种表达式

$$T_{em} = \frac{P_{mec}}{\Omega} = \frac{P_{mec}}{(1-s)\Omega_s} \tag{3.2-29}$$

式中，Ω 为转子旋转机械角速度，$\Omega = 2\pi n/60 = (1-s)\Omega_s$。由功率平衡方程式（3.2-26）可得转矩平衡方程

$$T_{em} = T_2 + T_0 \tag{3.2-30}$$

式中，T_2 为与输出功率相对应的负载转矩，$T_2 = P_2/\Omega$；T_0 为与风摩耗 P_{fv} 和附加损耗 P_s 相对应的空载转矩，可表示为

$$T_0 = \frac{P_{fv} + P_s}{\Omega}$$

4.2 电磁转矩表达式

电磁转矩是旋转电机实现机电能量转换的核心，是由气隙基波磁场与转子导体电流相互作用的结果。对于感应电动机，图 3.2-6 表示气隙基波磁场、转子导体电流分布以及导体受力产生的电磁转矩空间分布。

气隙基波磁场分布表示为

$$B_1(\theta) = B_\delta\sin\theta$$

式中，θ 为空间电角度；B_δ 为气隙磁通密度最大值。

由 $e = Blv$ 的基本关系式可知，转子导体的感应电动势的空间分布 $E_{2s}(\theta)$ 与磁场基波 $B_1(\theta)$ 在空间同相位，当转子电流滞后转子感应电动势一个时间电角度 ψ_2 时，则转子导体电流空间分布 $I_2(\theta)$ 也滞后 $E_{2s}(\theta)$ 一个空间电角度 ψ_2，可表示为

$$I_2(\theta) = I_{2m}\sin(\theta - \psi_2)$$

式中，I_{2m} 为导体电流最大值。

由每一根载流导体产生的电磁力 $f = Bli$，各导体的电磁力对转子中心（$D/2$）产生转矩，即可得 $T_{em}(\theta)$ 空间分布

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

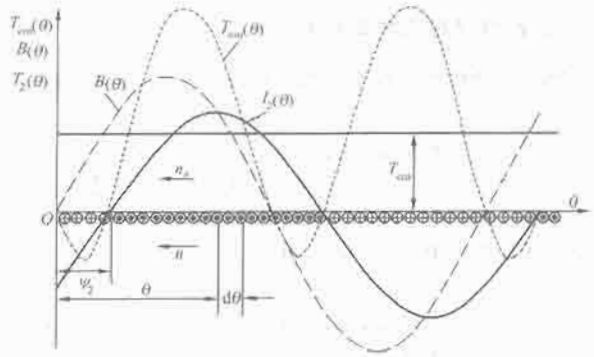


图 3.2-6　气隙基波磁场、转子电流和电磁转矩分布情况

曲线。由于 $B_1(\theta)$ 分布波对转子以 sn_s 运动，$I_2(\theta)$ 也以 sn_s 对转子运动，显然，由此两个波得到的 $T_{em}(\theta)$ 波对转子导体也以 sn_s 运动。由此说明，电磁转矩波分布情况不变，由于它是运动的，所以每根导体受力是交变的；任一瞬间转子各导体受力有大有小、有正有负，但只要 $\psi_2 \neq \pi/2$，即存在正的或负的平均电磁转矩，此即为电机工作时所需要的、人们通常习惯所称为的电磁转矩。根据电磁转矩分布波 $T_{em}(\theta)$，可以求得电机的平均电磁转矩为

$$T_{em} = 2p\int_0^{\pi}\frac{D}{2}B_\delta I_{2m} l_{ef}\frac{Z_2}{2p\pi}\sin\theta\sin(\theta-\psi_2)\mathrm{d}\theta$$
$$= \frac{Z_2}{4}B_\delta l_{ef} D\sqrt{2}I_2\cos\psi_2$$

式中，Z_2 为转子导体数，$Z_2 = 2m_2 N_2 K_{dp2}$，而每极磁通量为 $\Phi_m = B_\delta l_{ef} D/p$，所以有

$$T_{em} = \frac{m_2 N_2 K_{dp2}}{\sqrt{2}} p\Phi_m I_2\cos\psi_2 \tag{3.2-31}$$

式（3.2-31）说明，仅有转子电流的有功分量产生平均电磁转矩。

由等效电路可得用参数表达的电磁转矩关系式

$$T_{em} = \frac{pm_1 U_1^2\dfrac{R_2'}{s}}{2\pi f_1\left[\left(R_1+\dfrac{\sigma_1 R_2'}{s}\right)^2+(X_1+\sigma_1 X_2')^2\right]} \tag{3.2-32}$$

由式（3.2-32）经推导，可得一种实用的电磁转矩公式

$$\frac{T_{em}}{T_{max}} = \frac{2\left(1+\dfrac{R_1}{\sigma_1 R_2'}s_m\right)}{\dfrac{s_m}{s}+\dfrac{s}{s_m}+2\dfrac{R_1}{\sigma_1 R_2'}s_m} \approx \frac{2(1+s_m)}{\dfrac{s_m}{s}+\dfrac{s}{s_m}+2s_m} \tag{3.2-33}$$

式中，T_{max} 为最大电磁转矩；s_m 为与最大电磁转矩对应的最大转差率（参见本章 4.3 节）。当 $s_m<0.2$ 时，式（3.2-33）可进一步简化，得到简化实用电磁转矩公式

$$\frac{T_{em}}{T_{max}} \approx \frac{2}{\dfrac{s_m}{s}+\dfrac{s}{s_m}} \tag{3.2-34}$$

4.3　转矩转差特性

由（3.2-32）可见，当电压 U_1 和电源频率 f_1 不变时，电机的参数可以认为是常数，电磁转矩仅与转差率 s 或转速 n 有关，关系曲线 $T_{em} = f(s)$ 称为感应电机的转矩转差特性，如图 3.2-7 所示。由图可见，当改变转差率的值时，转矩随转差率而变化使感应电机呈现出三种运行状态：

1）当 $0<s<1$，电机运行于电动机状态，电磁转矩为驱动性质。

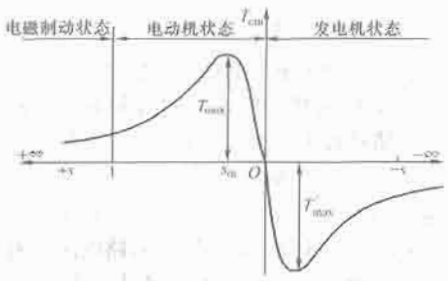


图 3.2-7　转矩转差特性

2）当 $s>1$，电机运行于电磁制动状态，其 $T_{em} = f(s)$ 曲线是电动机状态曲线的延伸。

3）当 $s<0$，电机运行于发电机状态，其电磁转矩变为负值，对原动机起制动作用，其曲线形状与电动机状态时相似，但在同样的参数条件下，发电机的最大电磁转矩比电动机的稍微要大些。

由式（3.2-32），将电磁转矩 T_{em} 对转差率 s 求导，并令

$$\frac{\mathrm{d}T_{em}}{\mathrm{d}s} = 0$$

即可得到最大电磁转矩和发生最大转矩时的转差率，分别为

$$\left.\begin{aligned} T_{max} &= \pm\frac{m_1 pU_1^2}{4\pi f_1\sigma_1\left[\pm R_1+\sqrt{R_1^2+(X_1+\sigma_1 X_2')^2}\right]} \\ s_m &= \pm\frac{\sigma_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2+(X_1+\sigma_1 X_2')^2}} \end{aligned}\right\} \tag{3.2-35}$$

式中，"+" 对应于电动机状态；"−" 对应于发电机状态。

通常，$R_1^2/(X_1+\sigma_1 X_2')^2<5\%$，故可以略去 R_1，于是以上两式可以简化为

$$\left.\begin{aligned} T_{max} &= \pm\frac{m_1 pU_1^2}{4\pi f_1\sigma_1(X_1+\sigma_1 X_2')} \\ s_m &= \pm\frac{\sigma_1 R_2'}{X_1+\sigma_1 X_2'} \end{aligned}\right\} \tag{3.2-36}$$

分析式（3.2-35）可知，最大电磁转矩 T_{max} 有以下特点：

1）在给定频率下，最大电磁转矩 T_{max} 与电源电压 U_1 的二次方成正比。

2）频率 f_1 一定时，最大电磁转矩 T_{max} 近似地与 X_1+X_2' 成反比，X_1+X_2' 越大，T_{max} 越小。

3）最大电磁转矩与转子回路电阻无关，但转差率 s_m 与 R_2' 有关，故当改变转子回路电阻时（如绕线型转子回路串入附加电阻），T_{max} 不变，但 s_m 增大，整个 $T_{em} = f(s)$ 曲线沿 s 增加方向移动，如图 3.2-8 所示。

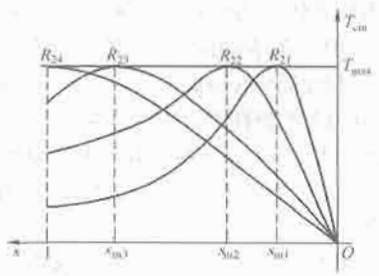


图 3.2-8　转子回路电阻对转矩特性的影响

$R_{24}>R_{23}>R_{22}>R_{21}$

在额定电压和额定频率下得到的最大电磁转矩与额定输出转矩之比，定义为感应电动机的过载能力（过载倍数）

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$k_m = \frac{T_{max}}{T_N}$$

过载能力是感应电动机重要的性能指标之一。

当 $s=1$ 时，即电机的转速为零时的电磁转矩即为起动转矩，又称为堵转转矩，由式（3.2-32）可得

$$T_{st} = \frac{pm_1 U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + \sigma_1 R_2')^2 + (X_1 + \sigma_1 X_2')^2]} \quad (3.2\text{-}37)$$

由式（3.2-37）可知，增加转子回路电阻，有利于提高起动转矩。要使电机的起动转矩最大，令 $s_m = 1$，由式（3.2-35）可得

$$R_2' = \frac{1}{\sigma_1}\sqrt{R_1^2 + (X_1 + \sigma_1 X_2')^2}$$

在额定电压和额定频率下得到的起动转矩对额定输出转矩之比，定义为感应电动机的起动转矩倍数

$$k_{Tst} = \frac{T_{st}}{T_N}$$

令 $s=1$，利用等效电路可以计算出额定电压和额定频率下的定子电流称为起动电流，将起动电流对额定电流之比定义为起动电流倍数

$$k_{Ist} = \frac{I_{st}}{I_N}$$

起动转矩倍数和起动电流倍数也是感应电动机重要的性能指标。

5 运行特性

5.1 特性曲线

感应电动机的运行特性是指在电机端电压和电源频率保持常数时（通常为额定值）、电动机的转速（或转差）、转矩、定子电流、效率和功率因数与输出功率的关系，即当 U_1，$f_1=C$ 时，n（或 s），T_{em}，I_1，η，$\cos\varphi_1 = f(P_2)$ 的特性曲线，图 3.2-9 为用标么值表示的一般用途感应电动机的典型运行特性曲线。

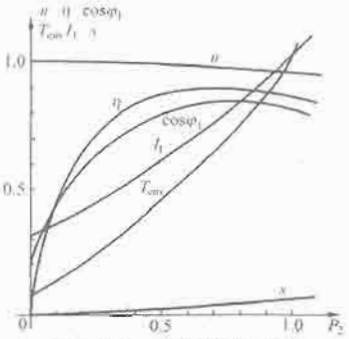


图 3.2-9 运行特性曲线

由图 3.2-9 可知：

1）从空载到满载范围运行时，电机的转速有所下降，但下降幅度不大，一般用途感应电机满载转差率约为0.015～0.05，即满载时的转速仅比同步转速低 1.5%～5%，这取决于电机的转子铜损耗大小及其在损耗中所占的比例。

2）轻载时电机的功率因数很低，主要原因是感应电动机的励磁电流在定子电流中所占的比例较大，而励磁电流分量是无功电流。

3）轻载时电机的效率较低，随着负载增加到 50%额定值以上时，效率较高且变化平坦。

4）定子电流和电磁转矩随着负载增大而增加，空载时定子电流仍有较大值，主要原因仍然是感应电动机的励磁电流分量较大。

5.2 运行特性与负载率的关系

感应电动机的负载率是指运行时的输出功率对额定功率之比。

电机从空载到额定负载运行，由于所加电压不变，气隙内的主磁通变化很小，电机的转速变化也很小，铁损耗与风摩损耗可认为不变，将这两项损耗称为不变损耗。定子、转子铜损耗与各自电流的二次方成正比，附加损耗也随负载的增加而增加，这三项损耗称为可变损耗。空载时负载率为零，电动机的效率为零，当负载率从零增大时，总损耗中仅可变损耗增加，因此损耗增加较慢，效率曲线上升较快，直到随着负载率增大，可变损耗增加到等于不变损耗时，效率达到最大值。若负载率继续增大，由于定、转子绕组铜损耗增加很快，效率反而会下降。对于一般用途中小型感应电动机，负载率在 0.75 左右效率达到最大值。

感应电动机必须从电网吸收滞后的励磁电流，功率因数永远小于 1。同时，由于定子与转子之间存在气隙，因此励磁电流分量占有定子电流较大部分，空载运行时，感应电机的定子电流基本上是励磁电流，因此空载时功率因数很低，通常小于 0.2。随着负载率的增大，定子电流的有功分量增加，功率因数逐渐增大，在额定负载附近，功率因数达到最大值。当负载继续增大时，转差会变大，使转子回路阻抗角变大、转子侧的功率因数下降，从而使定子侧的功率因数下降，因而，随着负载率的增大电动机的功率因数呈下降趋势。

对于普通用途的感应电机，其效率和功率因数均设计在额定负载附近达到最大值，因此，根据负载大小和运行时间长短合理选用电动机的容量，对节约能源有很大意义。

5.3 电压或频率偏差时对电机运行性能的影响

除特殊用途外，对于一般用途感应电动机，其性能指标均是按额定运行状况进行系列优选设计的，按照国家标准 GB 755—2000 规定，当电源电压在额定值±5%变化时（频率为额定），或者电源频率变化不超过±2%（电压为额定），或者电压和频率综合变化的某一区域内，电动机仍能输出额定转矩，但允许性能和温升限值与标准规定有所不同。表 3.2-4 列出当电压和频率低于额定值，负载转矩保持不变时，电机运行性能的变化趋势。

表 3.2-4 电压或频率偏差时运行性能的变化

运行性能	额定频率，电压低于额定值	额定电压，频率低于额定值
电磁转矩	因 $T_{em} \propto U_1^2$，T_{max} 减少，T_{st} 减少	因 $T_{em} \propto 1/f_1^2$，T_{max} 增大，T_{st} 增大
功率因数	因 $\Phi_m \propto U_1$，Φ_m减小，I_m随电压减小，$\cos\varphi_1$增大	因 $U_1 \approx E_1 \propto f_1\Phi_m = C_e\Phi_m$ 增大，故 I_m 增加，$\cos\varphi_1$降低
电流	因 Φ_m减小，$T_{em} \propto \Phi_m$，所以 I_2增大，而 I_m随电压减小，对大负载，I_1将增大	Φ_m 增大，故 I_m 增加，I_2减小，I_1将视 f_1 的变化幅度而定
转差率	因 $s \propto P_{Cu2}$，I_2增大，s 增大	因 $s \propto P_{Cu2}$，I_2减小，故 s 降低
转速	因 s 相对值很小，s 的变化对 n 影响小，所以 n 变化很小	因同步速度下降，故 n 降低
损耗	因 Φ_m减小，P_{Fe}下降，P_{Cu2}增大，$P_{fw}+P_s$基本不变，P_{Cu1}轻载时变化小，较大负载时会增大	P_{Fe} 增大，P_{Cu2} 减小，P_{fw}减小，P_{Cu1}视定子电流是增大或是降低而定
效率	轻载时 η 稍增加，较大负载时 η 会降低	因负载转矩不变，n 下降，输出功率减少，η 稍下降
温升	增加	铁心温升会增加

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

5.4　电压不对称时的运行

分析不对称运行时的基本方法是对称分量法。通常，感应电机不对称运行是由电压不对称所引起，在线性系统情况下，可将不对称电压分解成三种对称分量的叠加：正序、负序和零序分量

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_A &= \dot{U}_{A+} + \dot{U}_{A-} + \dot{U}_{A0}\\ \dot{U}_B &= a^2\dot{U}_{A+} + a\dot{U}_{A-} + \dot{U}_{A0}\\ \dot{U}_C &= a\dot{U}_{A+} + a^2\dot{U}_{A-} + \dot{U}_{A0}\end{aligned}\right\}$$

由此可得

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_{A+} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C)\\ \dot{U}_{A-} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C)\\ \dot{U}_{A0} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)\end{aligned}\right\} \qquad (3.2\text{-}38)$$

式中，a 为算子

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

对于定子绕组接成 Y 联结，但无中线引出，则无零序电流；若定子绕组接成△联结，由于三相电压（即线电压）之和为零，则零序电流也为零，因此，只需分析正序和负序分量，即仅考虑式（3.2-38）前两式。当电源频率为 f_1 时，利用前述分析三相对称运行的方法，对于正序和负序系统有：

正序电压　$\dot{U}_{1+} \rightarrow \dot{I}_{1+}, \dot{I}_{2+} \rightarrow \dot{\Phi}_{m+}$（正转 n_s）$\rightarrow T_{em+}$

负序电压　$\dot{U}_{1-} \rightarrow \dot{I}_{1-}, \dot{I}_{2-} \rightarrow \dot{\Phi}_{m-}$（反转 n_s）$\rightarrow T_{em-}$

当 $U_{1+} > U_{1-}$ 时，则正序电磁转矩大于负序电磁转矩，T_{em+} 为驱动转矩，而 T_{em-} 为制动性质转矩，电机转子向正序磁场方向旋转，如转子的旋转速度为 n，则正序转差率为

$$s_+ = \frac{n_s - n}{n_s} = s$$

负序转差率为

$$s_- = \frac{-n_s - n}{-n_s} = 2 - s$$

由于两个相序系统均为对称系统，可以如前得出等效电路，正序等效电路如图 3.2-2 和图 3.2-3 所示，负序 T 形和 L 形等效电路分别如图 3.2-10 和图 3.2-11 所示。如不考虑转子电流频率在正序与负序的不同对转子参数的影响，两种相序电路参数可以取得相同。但当转差很小时，转子中负序电流的频率为 $(2-s)f_1$，近似地接近于 $2f_1$，由于涡流的影响使转子的有效电阻增大，而使转子漏电抗减小，所以 $R'_{2-} > R'_{2+}$，$X'_{2-} < X'_{2+}$。

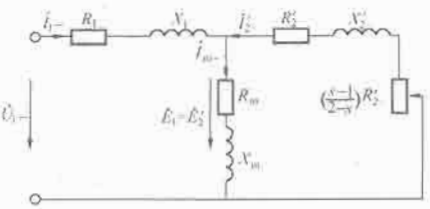


图 3.2-10　负序 T 形等效电路

利用等效电路，可以计算不对称电压下电机的特性，由于负序电磁转矩为制动转矩，将降低电动机的过载能力，但电动机正常运行时，由于转差率 s 很小，$(R'_{2+}/s) \gg R'_{2-}/(2-s)$，可见，由此引起的负序电磁转矩相对来说并不大。通过计算表明，负序电压分量达到额定电压的 5%时，电动机定子侧电流的负序分量可达额定电流的 20%～35%，因而，可能引起电机绕组过热。加之，负序磁场会在转子铁心内引起损耗和发热。所以，电压不对称时对电动机运行的影响，对电磁转矩的影响是次要的，发热的影响是主要的，应该防止过热或局部过热。

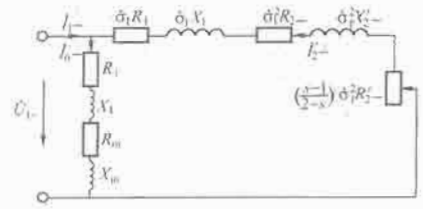


图 3.2-11　负序 L 形等效电路

根据国家标准 GB 755—2000 的规定，三相电动机应能在三相电压系统的电压负序分量不超过正序分量的 1%（长期运行）或不超过 1.5%（不超过几分钟的短时运行），且电压的零序分量不超过正序分量的 1%的条件下运行。

6　谐波分析及谐波影响

6.1　谐波分析

定、转子开槽是感应电机中产生谐波磁场的主要原因。由于绕组导体置于槽中，由三相导体电流在任一瞬间产生的磁动势波形呈阶梯形分布，将其进行傅里叶分析，除基波以外，还包括一系列高次谐波磁动势，其中包括相带谐波和齿谐波磁动势。图 3.2-12 表示每极每相三个槽的三相绕组、某一瞬间的磁动势分布波形以及波形分解。阶梯形波 1 是将槽电流集中在槽中心线上时、A 相电流达最大值瞬间的三相合成磁动势波，曲线 2 是相带磁动势波，它是假定每个相带中的载流导体均匀分布而获得，曲线 1 与曲线 2 之差即为齿谐波磁动势曲线 3，将曲线 2 分解出基波磁动势 4，剩余的即为相带谐波磁动势 5。

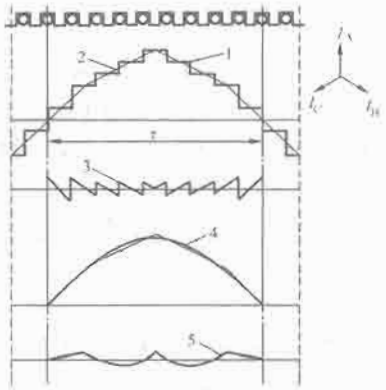


图 3.2-12　绕组磁动势分布及其谐波分解

1—三相槽电流合成实际磁动势；2—相带电流均布时的磁动势；3—齿谐波磁动势；4—基波磁动势；5—相带谐波磁动势

对于 60°相带绕组而言，每极每相槽数 q=整数，相数为 m_1，绕组的相带谐波磁动势次数为 $\nu = 2m_1k_1 \pm 1$。高次谐波中，次数为 $\nu_z = 2m_1qk_1 \pm 1$ 的谐波的绕组系数与基波的绕组系数相同，称为齿谐波磁动势，这里，次数表达式的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

符号取“+”为正转波，取“−”为反转波；$k_1=1,2,3$ 等任意正整数，为高次谐波的阶数，例如，对于 $k_1=1$ 的齿谐波称为一阶齿谐波，2，3 等类推。

定子谐波磁动势的极对数为 νp，幅值为

$$F_\nu=\frac{F_1}{\nu}=\frac{m_1\sqrt{2}}{\pi}\frac{N_1K_{dp\nu}}{\nu p}I_1$$

定子任一 ν 次谐波磁动势对空间固定坐标系的转速为

$$n_\nu=\pm\frac{60f_1}{\nu p}=\pm\frac{n_s}{\nu}$$

由于定、转子有槽，使气隙不均匀，气隙磁导不是常数，即使在基波磁动势作用下，也不会产生正旋波磁场，除基波磁场外，还存在一系列高次谐波磁场，将其称为齿磁导谐波磁场。图 3.2-13 表示定子开槽，转子表面光滑时由定子基波磁动势产生的齿磁导谐波磁场，它是取一阶齿谐波而获得的。由实际磁场波形 $B(x,t)$ 中分解出基波磁场 $B_1(x,t)$ 后，剩余的即为齿谐波磁场 B_z。因为齿谐波的波数为 $(Q_1\pi)/(p\tau)$，当齿谐波磁场的包络线为正旋分布时，其表达式为

$$B_z=B_{zm}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{\tau}\right)\cos\left(\frac{\pi}{\tau}\frac{Q_1}{p}x\right)$$

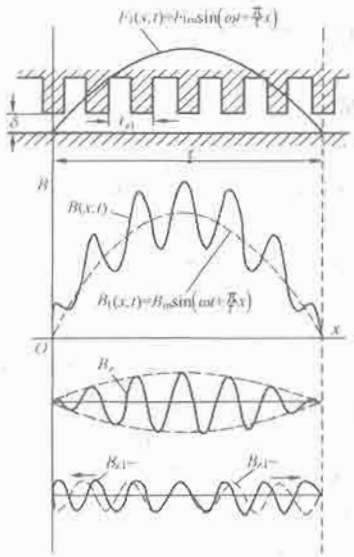


图 3.2-13 齿磁导谐波磁场

式中，Q_1 为定子槽数；B_{zm} 为基波磁动势作用下，齿中心处的磁场幅值扣除基波磁场幅值后的齿谐波磁场幅值。上式包含两个分量，其表达式为

$$B_{z+}=\frac{B_{zm}}{2}\sin\left[\omega t+\frac{\pi}{\tau}\left(\frac{Q_1}{p}+1\right)x\right]$$

$$B_{z-}=\frac{B_{zm}}{2}\sin\left[\omega t-\frac{\pi}{\tau}\left(\frac{Q_1}{p}-1\right)x\right]$$

它们代表两个旋转磁场，正转齿谐波 B_{z+} 的极对数为 (Q_1+p)，转向与基波同，转速为

$$n_{z+}=\frac{n_s}{\frac{Q_1}{p}+1}$$

反转波齿谐波 B_{z-} 的极对数为 (Q_1-p)，转向与基相反，转速为

$$n_{z-}=\frac{n_s}{\frac{Q_1}{p}-1}$$

除了定子基波磁动势和定子开槽引起各次齿谐波磁场外，定子各次谐波磁动势也会引起齿谐波磁场。另外，转子基波磁动势和转子开槽会引起齿谐波磁场，转子谐波磁动势也会引起齿谐波磁场，所以，感应电机的谐波磁场是一个比较复杂的问题。谐波磁场对感应电机的运行带来许多不利影响，它们是产生附加转矩、附加损耗以及振动和电磁噪声的根源。

6.2 附加转矩

感应电机气隙中，存在着由各种原因产生的不同转速的谐波磁场，它们与转子中的感应电流相互作用产生的转矩称为附加转矩。附加转矩分为两大类，即异步附加转矩和同步附加转矩。分析表明，当电机在额定转速下运行时附加转矩数值很小，起主要作用的是基波磁场产生的转矩而忽略谐波磁场的影响。但在低转速下，附加转矩的数值可能很大，尤其在起动过程中，附加转矩随转速而变化，严重情况下将影响电机的起动。应该指出，附加转矩主要对笼型感应电动机的起动产生影响，因为笼型感应电动机转子的磁极对数是随定子激励的气隙磁场而变。而绕线转子感应电动机的转子绕组连接成以后，则磁极对数固定不变。另外，绕线转子感应电动机可以通过转子回路串入电阻改善起动特性。

6.2.1 异步附加转矩

在线性条件下，利用叠加原理研究异步附加转矩。如同基波磁场一样，定子建立的每一次高次谐波磁场与由它感应的转子电流所建立的相同次数磁场相互作用产生的转矩（仅对笼型感应电动机转子才有相同极数），称为异步附加转矩。将各次谐波产生的附加转矩与基波转矩叠加得到合成的异步转矩。

在三相电机定子绕组磁动势中，存在 $\nu=6k\pm1$ 次谐波，其中以 5 次和 7 次影响较大。ν 次谐波的转速为

$$n_\nu=\pm\frac{1}{\nu}n_s$$

转子在此转速时，对该次谐波而言就是它的同步转速，相当于这个转速的转差率为

$$s=\frac{n_s-n_\nu}{n_s}=1\mp\frac{1}{\nu}$$

例如，对 7 次谐波磁场是正转波，它的同步转速是 $n_s/7$，此时的转差率为 $s=6/7$，当电机在此转速（转差率）下运行时，7 次谐波磁场在转子内感应的电流为零，因而 7 次谐波的电磁转矩 $T_{em7}=0$。当 $0<n<n_s/7(1>s>6/7)$ 时，$T_{em7}>0$，呈电动机运行状态；当 $n>n_s/7(s<6/7)$ 时，$T_{em7}<0$，呈发电机运行状态。5 次谐波磁场是反转波，它的同步转速是 $-n_s/5$，此时的转差率为 $s=6/5$，当电机在此转速（转差率）下运行时，5 次谐波磁场在转子内感应的电流为零，因而 5 次谐波的电磁转矩 $T_{em5}=0$。对 5 次谐波磁场而言，当 $n<-n_s/5(s>6/5)$ 时，$T_{em5}>0$，呈发电机状态；当 $n>-n_s/5(s<6/5)$ 时，$T_{em5}<0$，在转差率 $1<s<1.2$ 范围内，呈电动机状态；在 $0<s<1$ 范围内，呈电磁制动状态。对基波磁场产生的转矩而言，在任何转子转速下，5 次谐波磁场都是产生制动性质的转矩。图 3.2-14 给出了 5

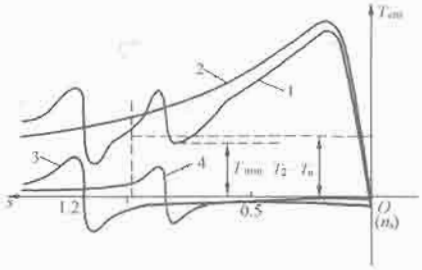


图 3.2-14 异步附加转矩
（5 次、7 次与基波的合成）
1—合成转矩；2—基波磁场电磁转矩；
3—5 次谐波电磁转矩；4—7 次谐波电磁转矩

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

次、7 次和基波转矩的合成转矩曲线。由图可见，与基波转矩曲线比较，转矩曲线发生畸变，出现明显下凹，对电动机起动极为不利。在 $0<s<1$ 范围内，存在有一最小转矩 T_{min}。在电动机起动过程中，如果负载转矩大于最小转矩，但小于起动转矩，电机起动后，转速会在 $n_s/7$ 附近"爬行"而不会上升到所需的正常运行速度。

6.2.2　同步附加转矩

由定子的某一次谐波磁场和转子的有相同极对数的某一次谐波磁场，它们之间没有任何直接联系，在某一特定转速下，这两个磁场在空间同步旋转而相对静止，它们相互作用产生像同步电机一样的转矩，称为同步附加转矩。如果转速改变，两个磁场在空间即失去同步，产生的平均转矩为零。图 3.2-15 表示同步附加转矩产生原理，定子有某一极对数 $p_{s\nu}$ 的谐波磁场，以转速 $n_{s\nu}$ 对定子顺向旋转，转子上有相同极对数 $p_{r\nu}$ 谐波，以转速 $n_{r\nu}$ 对转子反向旋转，当转子的转速 n 相对定子顺向旋转达到某一值时，$p_{s\nu}$ 谐波与 $p_{r\nu}$ 谐波同步同向旋转，定子磁场与转子磁场是异极性相对，且转子落后定子一个角度时，产生正的同步附加转矩[见图 3.2-15(a)]；如果定子磁场与转子磁场是同极性相对，且转子落后定子一个角度时，产生负的同步附加转矩[见图 3.2-15(b)]。同步附加转矩叠加在基波异步转矩特性上使电机的转矩特性形成严重"低谷"，造成起动过程中的"死点"，如图 3.2-16 所示。

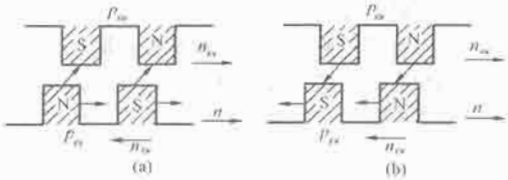


图 3.2-15　同步附加转矩产生原理
(a) 正的同步附加转矩；(b) 负的同步附加转矩

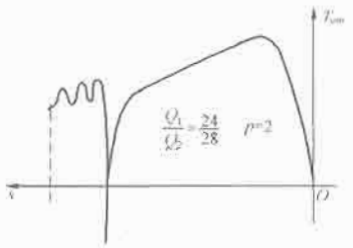


图 3.2-16　同步附加转矩影响

产生同步附加转矩主要是定子和转子的齿谐波磁动势产生的谐波磁场，由转子的齿谐波次数 $\nu_{r\tau}=\pm Q_2+1$ 与定子的齿谐波次数 $\nu_{s\tau}=\pm Q_1+1$ 产生的同步附加转矩最为严重，这里 Q_1 和 Q_2 分别为定子槽数和转子槽数。分析结果表明，当定、转子的槽数配合为

$$Q_1=Q_2$$

或

$$Q_1-Q_2=\pm 2p$$

时，将产生同步附加转矩，设计时应该避免选择此种槽数配合。

6.3　电磁振动力

在感应电机中，除了机械原因外，由高次谐波磁场特别是齿谐波磁效应所引起的振动和噪声更为严重。电磁振动力是因定子和转子铁心之间存在不均匀的单向磁拉力所致，它是引起电磁振动和噪声的根源。

感应电机的定子槽数一般都采用偶数，定子齿谐波磁场的次数 $\nu_{s\tau}=(Q_1/p)\pm 1$ 总为奇次，当转子齿谐波磁场的次数 $\nu_{r\tau}=(Q_2/p)\pm 1$ 为偶数时，则奇次谐波磁场和偶次谐波磁场相互干扰，使得其合成磁场沿转子圆周的分布不对称，如图 3.2-17 所示。某一瞬间转子圆周直径 ab 上的 a 点处，磁通密度最大，而在另一端 b 处磁通密度最小，径向磁拉力与磁通密度的二次方成正比，结果是 a 点上转子受到不平衡的磁拉力。当齿谐波磁场旋转时，这种不对称磁场分布波也随之旋转，由此引起电机的振动和噪声。

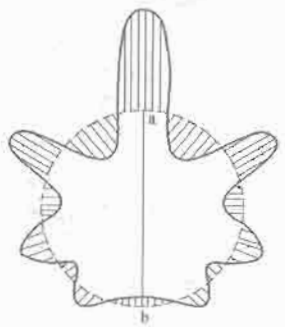


图 3.2-17　电磁振动力的产生

7　单相感应电机气隙磁场和转矩特性

7.1　基本工作原理和气隙磁场

图 3.2-18 表示单相感应电动机的工作原理。由单相交流电源供电的单相绕组产生一个脉动磁动势，其基波磁动势所建立的磁场为脉动磁场 B_1，可将其分解为幅值相等并等于脉动磁场幅值的一半 $B_m/2$、转速相同但转向相反的两个旋转磁场。单相绕组产生的基波脉动磁场及其分解的表达式为

$$B_1(x,t)=B_m\sin\omega t\cos\frac{\pi}{\tau}x$$

$$=\frac{B_m}{2}\sin\left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right)+\frac{B_m}{2}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{\tau}x\right)$$

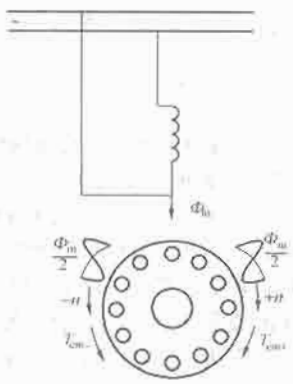


图 3.2-18　单相感应电动机工作原理

由这两个磁场在转子绕组中感应电流，各自与产生它的磁场相互作用，当转子不动时，产生大小相等、方向相反的电磁转矩，因此，作用在转轴上的合成转矩为零，电动机不能转动，也就是单相感应电动机没有起动转矩。

7.2　等效电路与转矩特性

当单相感应电动机以转速 n，在某一方向旋转时，例如

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

向正转磁场方向旋转，则对正转波而言，转子的转差率为

$$s_+ = s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

对反转磁场而言，转子的转差率为

$$s_- = \frac{n_s + n}{n_s} = 2 - s$$

利用旋转磁场理论和分析不对称电压下感应电机运行的方法，可得单相感应电动机的等效电路如图 3.2-19 所示。

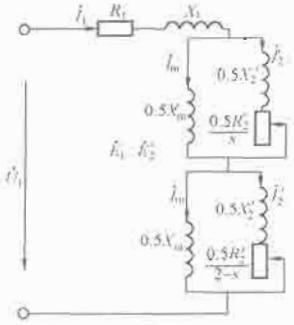


图 3.2-19 单相感应电动机等效电路

在已知电压及电动机参数条件下，由等效电路可计算正序电流 I'_{2+} 和负序电流 I'_{2-}，从而求得单相感应电动机的电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{p}{2\pi f}\left(I'^2_{2+}\frac{0.5R'_2}{s} - I'^2_{2-}\frac{0.5R'_2}{2-s}\right) \quad (3.2\text{-}39)$$

在忽略励磁电流情况下，有

$$I'_{2+} = I'_{2-} = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{0.5R'_2}{s} + \frac{0.5R'_2}{2-s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (3.2\text{-}40)$$

电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{pU_1^2}{2\pi f}\frac{\frac{0.5R'_2}{s} - \frac{0.5R'_2}{2-s}}{\left(R_1 + \frac{0.5R'_2}{s} + \frac{0.5R'_2}{2-s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (3.2\text{-}41)$$

由式（3.2-41）可得单相感应电动机的转矩特性，如图 3.2-20 所示。图中虚线表示正序与负序转矩，而实线表示合成单相转矩。可见，在 $s=1$ 的坐标点两边，转矩曲线 $T_{em} = f(s)$ 是对称的。当 $s=1$ 即转子静止时，合成转矩为零，电动机没有起动转矩；当转子以某一转速向正的或反向转动时，均存在正的或负的合成转矩驱使转子转动。因此，只要借助于一种起动方法，使电动机向正的或反的方向施加起动转矩，电动机将沿该转向旋转，并能带一定负载而稳定运行。

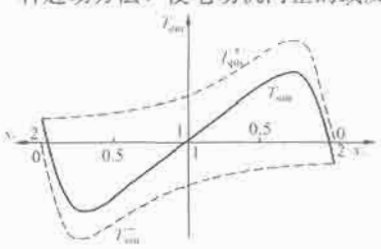


图 3.2-20 单相感应电动机转矩特性

7.3 起动方法和单相电容电动机

单相感应电动机必须设置一个起动绕组，以建立起动转矩。因此，单相感应电动机通常定子上有两套绕组，如图 3.2-21 所示，一套为工作绕组（M），另一套为辅助绕组（A），供起动用，它与工作绕组在空间上移 90°电角度，并与电容器串联，使电流超前。这样，两个绕组在空间上有位移，电流在时间上也有位移，因而能够产生旋转磁场。如果辅助绕组仅供起动用，则电动机起动完毕，转速达到额定转速的 70%～80%后，利用电机轴上装好的离心式开关将其自动断开，由主绕组单独工作。如果将串有电容器的辅助绕组设计成长期运行，则此种电机就是一种单相电源供电的两相电容电动机。串电容器的辅助绕组无论用作起动或是长期运行，均是采用电容裂相方法获得单相感应电动机的起动转矩。如果仅仅为了起动作用，尚可采用串电阻，或是串电感裂相方法。对于小功率单相感应电动机，采用凸极形式的罩极裂相方法，也可以产生起动转矩，达到起动单相电动机的目的。

采用电容裂相方法的单相感应电动机，串联电容器的电容值的配置有两种方法，一种是按获得最大起动转矩的要求配置，此时，使辅助绕组的电流超前工作绕组电流 90°电角度，从而获得圆形旋转磁场；另一种是按长期运行要求在某种工况下例如额定运行情况配置电容值，使之在圆形旋转磁场运行，电动机的运行性能最佳。应该指出，从等效电路可知，由于绕组电流是转差率的函数，电容值仅能针对某一种负载工况配置，电机才达到最佳运行状况，而负载改变时，除非电容值随之改变，否则电机将在椭圆旋转磁场下运行，电机达不到最佳运行状况。因此，对于起动性能要求比较高的单相电容电动机，需要配置两组电容器，一组供起动用，起动完毕后断开；另一组供长期运行用，如图 3.2-21 中的虚线所示。

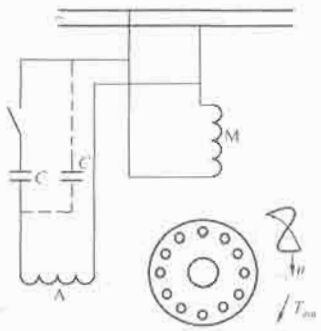


图 3.2-21 单相电容起动电动机

图 3.2-22 表示建立圆形磁场条件下单相电容电动机的

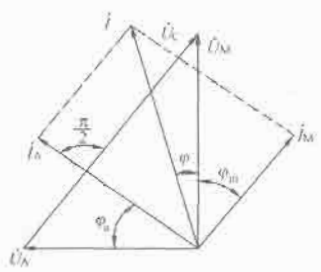


图 3.2-22 电容电动机相量图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

电流和电压关系，当工作绕组的有效匝数与辅助绕组的有效匝数不相等时，则必须有

$$\dot{U}_A = \mathrm{j}k_u\dot{U}_M$$

式中，k_u为有效匝数比，$k_u = (W_A k_{Adp1})/(W_M K_{Adp1})$，其中，$W_M$ 和 K_{Mdp1} 为工作绕组匝数和基波绕组系数，W_A 和 K_{Adp1} 为辅助绕组匝数和基波绕组系数。相应地得到电流关系有

$$\dot{I}_A = \mathrm{j}\dot{I}_M / k_u$$

从图 3.2-22 中的相量关系，可以得到产生圆形旋转磁场的电容值为

$$C = \frac{I_A}{\omega\sqrt{U_A^2 + U_M^2}} = \frac{I_A \sin\varphi_u}{\omega U_A}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 3 章 三相感应电动机设计

三相感应电动机设计包括电磁设计、结构设计、通风温升和振动噪声计算等方面的内容。

电磁设计是根据电机产品的技术要求，并考虑制造、运行的经济合理性和可靠性，以决定电机定、转子冲片和铁心的各种尺寸及绕组数据。结构设计是根据电机的使用要求、技术条件以及电磁设计所确定的有关数据，解决电机的机械设计问题。电机通风温升、振动噪声计算是在设计阶段对电机的绕组温度分布和平均温升、电磁噪声、机械噪声和通风噪声的数值，进行定量分析，从而对电磁设计和结构设计作综合分析和调整，使电机的设计方案更合理。采用计算机辅助电机设计有助于提高电机的设计水平，是电机设计的发展方向。

1 主要尺寸的确定

主要尺寸指定子铁心外径 D_a、内径 D_i 和铁心有效长度 l'。在已知电机的视在功率及转速时，可根据利用系数的经验值或通过适当选择电磁负荷，由下式计算

$$D_i^2 l' = \frac{S_e}{Cn_N} \approx \frac{S_e}{0.116 K_{dp} A B_\delta n_N \times 10^{-3}}$$

式中，S_e 为计算视在功率，kVA；C 为电机利用系数，kVA · min/m³，系电机有效部分单位体积、单位额定转速的计算视在功率；K_{dp} 为绕组因数；A 为线负荷，A/m；B_δ 为气隙磁通密度幅值，T；n_N 为额定转速，r/min。

求得 $D_i^2 l'$ 后，选用适当的 λ 值（定子铁心有效长度与极距之比），则可分别求得主要尺寸 D_i 和 l'，再参照定子铁心内外径之比的经验值便可求得定子铁心外径 D_a。

1.1 利用系数

电机的利用系数反映了材料的利用水平，随着电机通风冷却技术的发展，材料和工艺水平的改进，电机的利用系数有不断提高的趋势。感应电机的利用系数见表 3.3-1。

表 3.3-1 感应电机的利用系数 单位：kVA · min/m³

冷却及防护型式	内通风冷却 IP23			机壳表面冷却 IP44 及以上
功率范围（kW）	100 以下	100～1000	1000 以上	315 以下
利用系数 C	2.5～4	3.5～5	4～6	1.5～3

注 采用双层短距绕组的 2 极电机，由于节距短，绕组系数较低，故利用系数低于表列值。

1.2 电磁负荷

电磁负荷 A、B_δ 值直接影响电机的有效材料用量，并与电机的参数和运行性能有密切的关系。选择电磁负荷时要注意以下几点：

1）电机输出功率一定时，提高电磁负荷可缩小电机体积和节约有效材料。

2）选取较高的 B_δ，铁心损耗一般会增加，而绕组电阻损耗通常可降低。

3）选取较高的 A，绕组电阻损耗将增加。

4）励磁电流标么值与 B_δ/A 成正比，故选取较高的 B_δ 或较低的 A，励磁电流要增大，功率因数将降低。

5）漏抗标么值与 A/B_δ 成正比，故 B_δ 较高或 A 较低时漏抗会减小，电机堵转转矩及过载能力提高，但堵转电流也增大。

电磁负荷的取值范围为：对内通风 IP23 电机，$A \approx 300 \sim 600$A/cm；对机壳表面冷却 IP44、IP54、IP55 电机，$A \approx 200 \sim 350$A/cm。各类感应电机的 $B_\delta \approx 0.6 \sim 0.8$T。

2 冲片和铁心设计

2.1 定子冲片外径和内径

对应于系列电机的每一机座号，可根据合理利用机座径向空间和考虑硅钢片合理套裁等要求，确定合适的定子冲片外径 D_a。在实际生产中，由于已积累了丰富的实践经验，一般常直接选取定子冲片外径。

定子冲片内径 D_i 一般可按表 3.3-2 确定。

表 3.3-2 感应电动机的 D_i/D_a 值

极 数	2	4	6～10
小型感应电动机	0.54～0.57	0.62～0.67	0.66～0.75
大中型感应电动机	0.48～0.55	0.62～0.65	0.68～0.78

2.2 铁心有效长度与极距之比

铁心有效长度 l' 与极距 τ_p 之比 λ 对电机的技术经济指标有一定影响，当电机有效部分体积一定时，增大 λ 引起的影响如下：

1）定子和绕线转子绕组的端部导电材料减少，端部电阻损耗减小，但定、转子槽部的绕组电阻损耗一般增大。

2）电机细长，转子转动惯量小。

3）λ 值过大可能使槽内绕组轴向温差增大。

4）增加冲片冲剪、铁心叠压和嵌线工时。

在系列电机中，每一机座号的同一极数大都安排两个或两个以上功率，因此，具有同一内、外径的定子铁心就有两种或两种以上长度尺寸，故 λ 值范围一般较大。

2.3 气隙长度

气隙长度 δ 对电机性能及运行可靠性影响很大，确定 δ 值时应考虑以下因素：

1）为降低励磁电流，改善功率因数，气隙应尽量小。

2）气隙小，谐波磁场及谐波漏抗增大，使起动转矩稍有降低，杂散损耗增加，温升可能升高。

3）为保证电机运行可靠，避免气隙不均匀而引起定、转子相擦，气隙不能太小。小型电机气隙一般应不小于 0.25mm。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.4　槽数选择和槽配合

选择定子槽数时应考虑：

1）为减少谐波磁动势，除极数较多或在系列设计中同一机座号两种极数冲片通用的情况外，每极每相槽数 q_s 一般取整数。

2）为降低杂散损耗和提高功率因数，应选用较多的槽数。但槽数增多时，将增加槽绝缘，降低槽利用率，并增加线圈制造及嵌线工时。

感应电动机的 q_s 一般为 2～6，功率小、极数多时取较小值；功率大、极数少时取较大值；对功率较大的两极电机，q_s 可达 6～9。

选择转子槽数时必须与定子槽数有恰当的配合。定、转子槽配合的选择应使电动机起动正常，转矩转速特性曲线平滑，起动及运行时无显著振动和电磁噪声、杂散损耗较小。

2.5　槽形选择和槽形尺寸的确定

感应电动机定子槽形最常用的有四种，如图 3.3-1 所示。

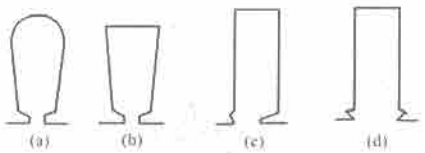


图 3.3-1　感应电动机定子常用槽形
（a）半闭口圆底槽；（b）半闭口平底槽；
（c）半开口槽；（d）开口槽

半闭口圆底槽和平底槽的底部比顶部宽，使齿壁基本平行，一般用于低压感应电动机。槽内安置由圆电磁线绕成的散嵌绕组。半闭口槽可以减少铁心表面损耗和齿部脉动损耗，并使气隙有效长度减小，功率因数得到改善。

采用成型绕组的低压感应电动机常用半开口槽，高压（3000V 及以上）感应电动机则采用开口槽。槽内整齐安置由扁电磁线绕制的成型绕组。这两种槽形由于槽口较大，使气隙磁场中的齿谐波分量增大，空载杂散损耗也较大。因此，可采用磁性槽楔，以降低空载杂散损耗。

感应电动机转子槽形种类很多，其中较常用的转子槽形如图 3.3-2 所示。

图 3.3-2 中，(a)和(b)用于小型电机的铸铝笼型转子及采用散嵌绕组的小型电机绕线转子；(c)用于铜笼型转子及采用成型绕组的大中型电机绕线转子；(d)和(e)用于较大功率的小型或中型电机铸铝笼型转子；(f)和(g)用于起动转矩要求较高的电机及大中型电机笼型转子，其中(f)用于铸铝转子，(g)用于铜笼型转子；(h)用于转子圆周速度较高的大中型电机铜笼型转子。

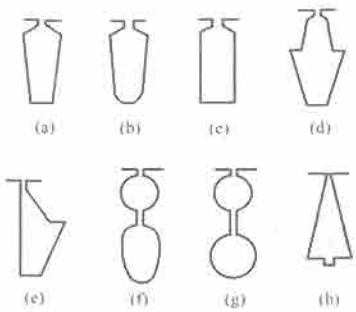


图 3.3-2　感应电动机
转子常用槽形

确定槽形尺寸时应考虑：

1）使槽有足够的截面积，以保证槽内导体电流密度在一定范围内。

2）有足够的齿宽和轭高，使铁心齿部、轭部磁通密度不致过高。由于机械强度或工艺限制，轭高和齿根宽度也不宜过小。

对所确定的槽形尺寸，应核算齿部和轭部的磁通密度，其数值一般应在下述范围内：齿部磁通密度 B_t 为 1.3～1.6T，轭部磁通密度 B_j 为 1.1～1.5T。确定笼型转子槽形尺寸时，还应考虑满足起动性能要求。

3　绕组设计

3.1　绕组型式的选用

感应电动机定子绕组的型式很多（参见第 1 篇第 2 章），常用的有单层同心式、单层链式、单层交叉式、双层叠绕组等。单层同心式绕组一般用于 $q_s=4$、6、8 的小功率 2 极电机，单层链式绕组一般用于 $q_s=2$ 的功率较小的 4、6、8 极电机，单层交叉式绕组主要用于 q_s 为奇数的功率较小的电机，双层叠绕组通常用于功率较大的电机。近年来，在小型电机中还采用了单双层绕组和正弦绕组，以进一步节省绕组用铜和改善电机性能。

感应电动机绕组转子一般采用双层绕组，其中小型电机常用双层叠绕组，大中型电机常用双层波绕组。对功率较小的电机，有时也采用单层绕组。

3.2　绕组联结

绕组联结一般有星形（Y）联结和三角形（△）联结。

小型电机额定功率 $P_N\leqslant 3$kW 时，一般用 Y 联结，功率较大时应考虑采用 Y-△起动，一般用△联结。

大中型电机，特别是电压 3000V 及以上的电机，一般用 Y 联结，但中型电机有时为得到合适的每相串联导体数，也可用△联结。

3.3　绕组节距

单层绕组一般都用整距。双层绕组则应从电机具有良好的电气性能和节约导电材料两方面来考虑节距的选择。在普通三相感应电动机中，一般选绕组节距 y 为 5/6 极距，这样可使基波绕组短距因数较高，同时也能削弱五次和七次相带谐波磁动势。

3.4　绕组并联支路数和每槽导体数

定子绕组并联支路数 a_s 应根据各并联支路中感应电动势的大小和相位相同的要求确定。当绕组电流 I_s 较大时，一般常把绕组接成 a_s 路并联，使每支路的电流减至 I_s/a_s；也可采用 N_s 根截面积相同的导线并绕，使每根导线所通过的电流减至 I_s/N_s；或者既采用 a_s 路并联，又采用 N_s 根导线并绕。选择时主要根据工艺条件考虑。双层绕组的并联支路数最多为 $2p$（$2p$ 为极数），而且 $2p/a_s$ 应为整数。单层绕组当 q_s 为偶数时，并联支路数最多为 $2p$；当 q_s 为奇数时，并联支路数最多为 p。转子绕组为避免极间接线过多，并联支路数 a_r 一般取 1。

绕组每槽导体数 Z_Q 应为整数。

对定子绕组，可按选定的气隙磁通密度 B_δ 估算定子绕组每相串联导体数

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$Z_{\Phi s}=\frac{K_E U_\Phi \times 10^4}{\sqrt{2} f K_{dp1} \tau_p l' B_\delta}$$

也可按选定的定子电负荷 A_s 估算

$$Z_{\Phi s}=\frac{\eta \cos\varphi \pi D_i A_s}{m_s I_w}$$

式中，K_E 为满载电动势与额定相电压比值，一般为 0.85～0.95（功率大极数小时取较大值）；U_Φ 为定子相电压，V；K_{dp1} 为定子基波绕组因数；τ_p 为极距，$\tau_p=\pi D_i/2p$，cm；l' 为铁心有效长度，cm；B_δ 为选定的气隙磁通密度幅值，T；η 为设计任务书给定的效率；$\cos\varphi$ 为设计任务书给定的功率因数；D_i 为定子冲片内径，cm；A_s 为选定的定子电负荷，A/cm；I_w 为定子绕组每相功电流，A，$I_w=P_N\times10^3/m_s U_\Phi$，其中，$P_N$ 为额定功率，kW，m_s 为定子相数。

定子绕组每槽导体数 Z_{Qs} 则可按下式求得

$$Z_{Qs}=\frac{m_s a_s Z_{\Phi s}}{Q_s}$$

式中，Q_s 为定子槽数。

对绕线转子，可根据转子开路电压设计每槽导体数 Z_{Qr}，大中型电机绕线转子一般取 Z_{Qr} 为 2。

3.5 导线规格

由选定的定子绕组导线电流密度 J_s 或定子热负荷 A_sJ_s，可求得导线截面积估算值

$$A_{cs}=\frac{J_s}{a_s J_s} \quad (mm^2)$$

或

$$A_{cs}=\frac{Q_s Z_{Qs}}{\pi D_i A_s J_s}\left(\frac{I_s}{a_s}\right)^2 \quad (mm^2)$$

根据 A_{cs} 可确定导线并绕根数 N_s 及导线规格。对采用圆导线的散嵌绕组，其导线直径一般小于 1.6mm；如所需的导线截面积 A_{cs} 较大时，可用多根导线并绕。对采用扁导线的成型绕组，其导线截面积 a(高度)×b(宽度)一般应小于 3mm×8mm，且 b/a 应在 1.5～4.0 范围内，a、b 的尺寸要与定子槽口、槽宽和槽高尺寸相配合。

绕线转子导线规格按转子导线电流密度 J_r 的选定值确定。笼型转子导条和端环面积分别按导条电流密度 J_B 和端环电流密度 J_R 的选定值确定。对铜笼型转子，一般 J_B=5～8A/mm²；对铸铝转子，一般 J_B=2～4A/mm²，J_R 则略低于 J_B 值。

3.6 槽满率

对圆导线散嵌绕组，可用槽满率 K_s(%)反映槽内导体的填充程度

$$K_s=\frac{Z_{Qs}N_s d^2}{A_{sef}}\times100$$

式中，d 为包括绝缘层的导线外径，mm；A_{sef} 为槽有效面积，由槽面积减去槽绝缘、层间绝缘、槽楔所占的面积后求得，mm²。

槽满率较高时，槽的利用率高，但槽满率过高，则嵌线困难，绝缘易受损伤。散嵌绕组的槽满率一般为 70%～80%。

4 运行性能计算

计算运行性能时，电机各参量常采用标幺值，其数值为实际值与所选定的基准值之比。感应电动机各参量的基准值见表 3.3-3。

注：本章物理量符号凡右上角带 * 者为标幺值。

表 3.3-3 感应电动机各参量的基准值

参量	基准值
功率	额定输出功率 $P_N\times10^3$ (W)
转矩	额定输出转矩 $T_N=\frac{9555P_N}{n_N}$ (N·m)
电压	额定相电压 U_Φ (V)
电流	功电流 $I_w=\frac{P_N\times10^3}{m_s U_\Phi}$ (A)
阻抗	$\frac{U_\Phi}{I_w}$ (Ω)

4.1 磁路计算

磁路计算是根据电机满载运行时的气隙每极主磁通，求出与该磁通相对应的磁路各部分磁通密度和磁动势，以求取所需的每极磁动势和励磁电流。

4.1.1 电机磁路

电机磁路由气隙、定子齿、定子轭、转子齿、转子轭五个部分组成，如图 3.3-3 所示。取主磁路磁通密度最大的途径作为每对极的计算磁回路，由于磁路对称，故仅需计算回路的一半（即每极）磁动势。

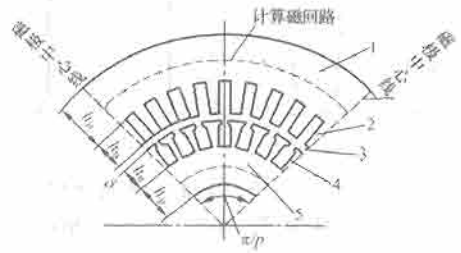


图 3.3-3 电机磁路（p=2）
1—定子轭；2—定子齿；3—气隙；
4—转子齿；5—转子轭

4.1.2 每极磁通

定子绕组产生满载电动势所需的每极主磁通为

$$\Phi_1=\frac{K_E U_\Phi}{2.22 f Z_{\Phi s} K_{dp1}} \quad (Wb)$$

4.1.3 磁通密度和磁动势计算

磁路各部分的磁通密度和磁动势可用分段法计算，一般按每段内磁场强度应接近相同的原则进行分段。每极磁路所需磁动势 F 为各分段磁路磁动势之和

$$F=\Sigma H_x l_x \quad (A)$$

式中，l_x 为磁路某段的长度，cm；H_x 为由 l_x 段磁通密度 B_x 所确定的磁场强度，A/cm。

4.1.4 励磁电流和励磁电抗

励磁电流有效值

$$I_m=\frac{4.44pF}{m_s Z_{\Phi s} K_{dp1}} \quad (A)$$

励磁电抗

$$X_m^*=\frac{K_E}{I_m^*}$$

4.2 参数计算

4.2.1 电阻

定子绕组每相电阻为

$$R_s=\frac{\rho_s Z_{\Phi s} l_{cs}\times10^4}{a_s N_s A_{cs}} \quad (\Omega) \qquad (3.3\text{-}1)$$

式中，l_{cs} 为定子线圈的半匝平均长度，cm；A_{cs} 为定子线圈每根导线截面积，mm²。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

绕线转子每相电阻 R_r 应以转子绕组数据代入式(3.3-1)计算，并应乘以阻抗折算系数 K_z（参见本篇第 2 章）折算到定子。

笼型转子一根导条的电阻为

$$R_B = \frac{\rho_B l_B \times 10^2}{A_B} \quad (\Omega)$$

式中，l_B 为转子导条长度，cm；A_B 为每根导条截面积，cm^2。

笼型转子相邻导条间的一段端环电阻为

$$R_R = \frac{\rho_R \pi D_R \times 10^2}{Q_r A_R} \quad (\Omega)$$

式中，D_R 为端环平均直径，cm；A_R 为端环截面积，cm^2；Q_r 为转子槽数。

上列各式中，ρ_s、ρ_B、ρ_R（Ω·m）分别为折算到基准工作温度时的各部分导体电阻率。

折算到定子的笼型转子电阻为

$$R_r = \left[R_B + \frac{1}{2}\left(\frac{Q_r}{\pi p}\right)^2 R_R\right] K_z \quad (\Omega)$$

4.2.2　漏抗

定子漏抗

$$X_s = X_{ss} + X_{ds} + X_{es}$$

$$= 0.4\pi^2 f \frac{Z_{\Phi s}^2}{p q_s} l' (\lambda_{ss} + \lambda_{ds} + \lambda_{es}) \times 10^{-8} \quad (\Omega)$$

绕线转子或一般笼型转子漏抗

$$X_r = X_{sr} + X_{dr} + X_{er} + X_{sk}$$

$$= 0.4\pi^2 f \frac{Z_{\Phi r}^2}{p q_r} l' (\lambda_{sr} + \lambda_{dr} + \lambda_{er} + \lambda_{sk}) K_z \times 10^{-8} \quad (\Omega)$$

式中，X_{ss}、X_{ds}、X_{es} 为定子的槽漏抗、谐波漏抗和端部漏抗；λ_{ss}、λ_{ds}、λ_{es} 为定子的槽比漏磁导、谐波比漏磁导和端部比漏磁导；X_{sr}、X_{dr}、X_{er}、X_{sk} 为转子的槽漏抗、谐波漏抗、端部漏抗和斜槽漏抗；λ_{sr}、λ_{dr}、λ_{er}、λ_{sk} 为转子的槽比漏磁导、谐波比漏磁导、端部比漏磁导和斜槽比漏磁导。

4.3　性能计算

4.3.1　满载电流和电动势

将本篇第 2 章图 3.2-3 所示 L 形等效电路中的电流 I_0 近似认为与励磁电流 I_m 相等，转子电流有功分量近似等于定子电流有功分量 I_P（包括励磁支路电流的有功分量），则可得到简化的电流相量图，如图 3.3-4 所示。满载时，各电流分量可计算如下：

有流有功分量

$$I_P^* = \frac{1}{\eta}$$

电抗电流（即转子电流无功分量）

$$I_X^* = \sigma_s X^* I_P^{*2} [1 + (\sigma_s X^* I_P^*)^2]$$

定子电流无功分量

$$I_Q^* = I_m^* + I_X^*$$

定子电流

$$I_s^* = \sqrt{I_P^{*2} + I_Q^{*2}}$$

$$I_s = I_s^* I_W \quad (A)$$

转子电流

$$I_r^* = \sqrt{I_P^{*2} + I_X^{*2}}$$

$$I_r = I_r^* I_W K_i \quad (A)$$

$$\sigma_s \approx \frac{X_s^* + X_m^*}{X_m^*} = 1 + \frac{I_m^* X_s^*}{K_E}$$

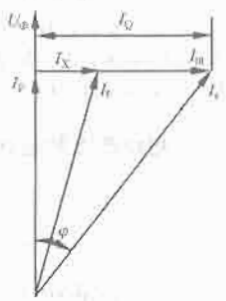


图 3.3-4　简化的电流相量图

$$X^* = X_s^* + X_r^*$$

式中，K_i 为转子电流折算系数（参见本篇第 2 章）。

对笼型转子，I_r 即为导条电流 I_B，端环电流为

$$I_R = \frac{Q_r}{2\pi p} I_B \quad (A)$$

满载电动势、空载电动势与额定相电压的比值分别为

$$K_E = 1 - (I_P^* R_s^* + I_Q^* X_s^*)$$

$$K_{E0} = 1 - I_m^* X_s^*$$

4.3.2　损耗

计算电机满载效率时的各种损耗包括：

1）定子绕组电阻损耗

$$P_{Cus}^* = I_s^{*2} R_s^*$$

2）转子绕组电阻损耗

$$P_{Cur}^* = I_r^{*2} R_r^*$$

3）空载铁损耗

$$P_{Fe}^* = (K_1 p_{ts} V_{ts} + K_2 p_{js} V_{js}) / (P_N \times 10^3)$$

式中，p_{ts}、p_{js} 为定子齿、轭单位铁损耗，W/cm^3，根据空载时的定子齿、轭部磁通密度查硅钢片损耗曲线确定；V_{ts}、V_{js} 为定子齿、轭体积，cm^3；K_1、K_2 为考虑空载杂散损耗和因加工使损耗增加的系数，一般取 $K_1 = 2 \sim 3.5$，$K_2 = 1.5 \sim 3$。

4）风摩损耗 P_{fw}^*，计算时一般参考相应规格电机的实测值确定。

5）杂散损耗 P_s^*，计算时参考相应规格电机的实测值或根据有关产品的技术条件确定。

4.3.3　力能指标和过载能力

1）满载效率

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P^*}{P_1^*}$$

式中，ΣP^* 为电机总损耗，$\Sigma P^* = P_{Cus}^* + P_{Cur}^* + P_{Fe}^* + P_{fw}^* + P_S^*$；$P_1^*$ 为电机输入功率，$P_1^* = 1 + \Sigma P^*$。

2）满载功率因数

$$\cos\varphi = \frac{I_P^*}{I_s^*} = \frac{1}{I_s^* \eta}$$

3）满载转差率 s_N 和额定转速 n_N

$$s_N = \frac{P_{Cur}^*}{P_{em}^*}$$

式中，P_{em}^* 为通过气隙传递的电磁功率，$P_{em}^* = P_1^* - P_{Cus}^* - P_{Fe}^*$。

$$n_N = \frac{60 f (1 - s_N)}{p} \quad (r/min)$$

4）最大转矩倍数。最大转矩倍数为最大电磁转矩与额定输出转矩之比

$$T_{max}^* = \frac{1 - s_N}{2[R_s^* + \sqrt{R_s^{*2} + (X_s^* + X_r^*)^2}]}$$

5　起动性能计算

笼型感应电动机必须计算起动电流和起动转矩，有时还需要计算起动时间和起动温升。起动时由于漏磁路饱和效应及转子导条的集肤效应，将使定、转子漏抗和转子电阻发生变化，在计算起动性能时应予考虑。

5.1　饱和效应计算

由于笼型感应电动机起动电流很大，漏磁通增大，将使漏磁路中定、转子齿顶部分铁心趋于饱和，从而导致谐波漏抗、斜槽漏抗和槽上部漏抗变小。饱和效应的工程计算可采用简化磁路法和综合磁路法。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

5.1.1 简化磁路法

取漏磁路长度为两倍气隙长度及定、转子齿距之和，当电动机起动时产生漏磁的定、转子每槽磁动势平均值 F_{st} 全部用来克服气隙磁位降（即不考虑铁心磁位降）时，所求得的虚拟磁通密度为

$$B_{l\cdot}=\frac{F_{st}}{1.6\delta\beta_c}\times10^{-4}\quad(\mathrm{T})$$

$$\beta_c=0.64+2.5\sqrt{\frac{\delta}{t_s+t_r}}$$

式中，δ 为气隙长度，cm；t_s、t_r 为定、转子齿距，cm。由 $B_{l\cdot}$ 值查图 3.3-5 可求得起动时漏磁饱和系数 K_{ss}，并由此求得饱和漏抗。

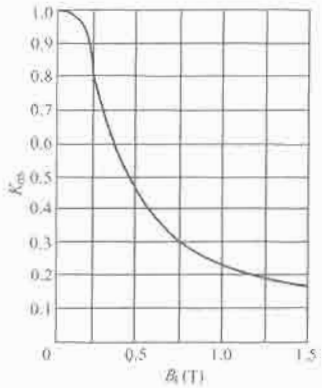


图 3.3-5 K_{ss}—$B_{l\cdot}$ 曲线

5.1.2 综合磁路法

在计算时综合考虑了定子齿对转子齿和定子齿对转子槽的漏磁路分布，其物理模型如图 3.3-6 所示。电机起动时，经过齿部饱和区域截面积 AB 和 DE 的有主磁通 Φ_m 和槽口漏磁通 Φ_{st}、谐波漏磁通 Φ_d 及斜槽漏磁通 Φ_{sk}。至于槽下部漏磁通和绕组端部漏磁通，由于它们不经过 AB 和 DE，可以按通常公式计算。根据起动时定子每槽磁动势 F_{st} 和转子每槽磁动势 F_{str} 计算图 3.3-6 两种典型位置齿部饱和区域的漏磁通，并以此来计算饱和漏抗。

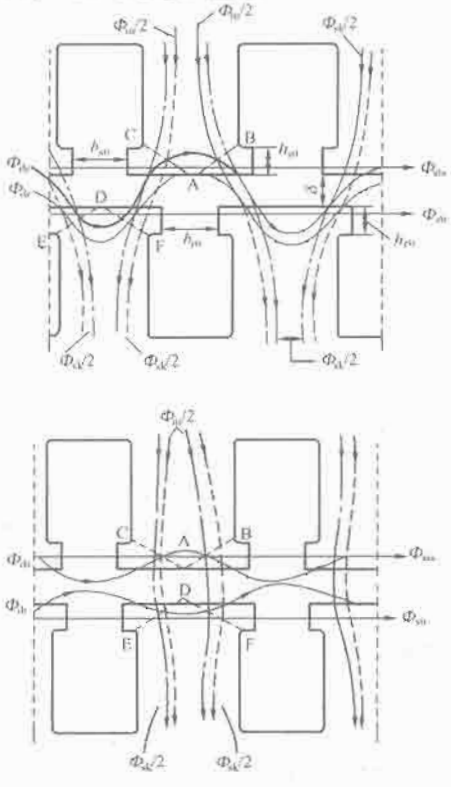


图 3.3-6 感应电机漏磁通分布图

5.2 集肤效应计算

笼型感应电动机起动时，由于转子槽内导体的集肤效应，从而使电阻增加，槽漏抗减小。集肤效应的工程计算可采用透入深度法和分层法。

5.2.1 透入深度法

起动时考虑集肤效应的转子导条相对高度为

$$\xi=1.987\times10^{-5}h_B\sqrt{\frac{b_B}{b_r}\frac{f}{\rho_B}}\quad(\mathrm{cm})$$

式中，h_B 为转子导条高度，cm；b_B/b_r 为转子导条宽与转子槽宽之比，对铸铝转子 $b_B/b_r\approx1$。

计算导条电阻和槽漏抗的等效高度 h_{PR} 和 h_{PX} 分别为

$$h_{PR}=\frac{h_B}{\varphi(\xi)}\quad(\mathrm{cm})$$

$$h_{PX}=h_B\psi(\xi)\quad(\mathrm{cm})$$

式中，$\varphi(\xi)=\xi\left(\dfrac{\sinh2\xi+\sin2\xi}{\cosh2\xi-\cos2\xi}\right)$，如图 3.3-7 所示；

$\psi(\xi)=\dfrac{3}{2\xi}\left(\dfrac{\sinh2\xi-\sin2\xi}{\cosh2\xi-\cos2\xi}\right)$，如图 3.3-7 所示。

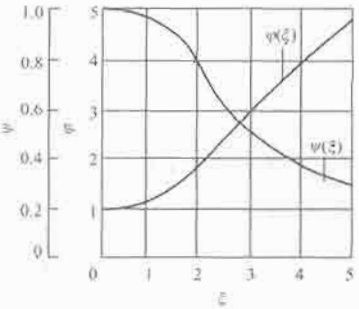


图 3.3-7 $\varphi(\xi)$ 和 $\psi(\xi)$ 曲线

由此可求得因集肤效应使电阻增大和槽漏抗减小的电阻修正系数 K_R 和电抗修正系数 K_X，对于矩形导条，$K_R=\varphi(\xi)$，$K_X=\psi(\xi)$。

5.2.2 分层法

将转子导条沿槽高分成若干层（见图 3.3-8），然后通过递推法求出各层的电流分布、电阻损耗和磁场能量，并由此求得电阻修正系数 K_R 和电抗修正系数 K_X。

电阻修正系数

$$K_R=\frac{\sum_{i=1}^{n}|\dot I_i|^2R_i}{|\dot I_1|^2R_0}$$

电抗修正系数

$$K_X=\frac{\sum_{p=1}^{n}\left(X_p\left|\sum_{i=1}^{p}\dot I_i\right|^2\right)}{\sum_{p=1}^{n}\left(X_p\left|\sum_{i=1}^{p}\frac{R_0}{R_i}\dot I_i\right|^2\right)}$$

式中，$\dot I_i$ 为导条第 i 层的电流；$\dot I_1$ 为导条总电流；R_i 为导条第 i 层的电阻；X_p 为导条第 p 层的漏电抗；R_0 为不考虑集肤效应时的导条电阻；n 为导条的分层层数，一般取 $n=30\sim50$。

5.3 起动电流和起动转矩的计算

一般笼型转子的起动电阻为

$$R_{rst}=\left[R_{Bst}+\frac{1}{2}\left(\frac{Q_r}{\pi p}\right)^2R_R\right]K_Z\quad(\Omega)$$

定子起动漏抗 X_{sst} 和一般笼型转子起动漏抗 X_{rst} 分别为

$$X_{sst}=X_{ssst}+X_{dsst}+X_{es}\quad(\Omega)$$

$$X_{rst}=X_{srst}+X_{drst}+X_{er}+X_{skst}\quad(\Omega)$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

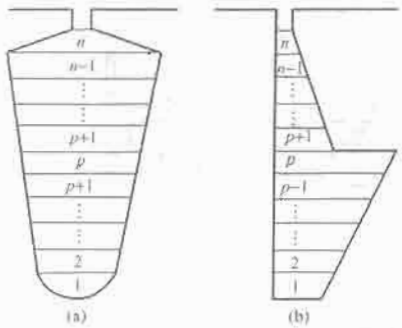


图 3.3-8　转子导条集肤效应的分层计算
(a) 圆底槽；(b) 刀形槽

起动阻抗为

$$Z_{st}^{*}=\sqrt{(R_s^{*}+R_{rst}^{*})^2+(X_{sst}^{*}+X_{rst}^{*})^2}$$

堵转电流倍数 $\overline{I}_k$ 为堵转电流与额定电流之比，可按下式计算

$$\overline{I}_k=\frac{1}{I_s^{*}Z_{st}^{*}}$$

堵转转矩倍数 $\overline{T}_k$ 为堵转时的电磁转矩与额定输出转矩之比，可按下式计算

$$\overline{T}_k=\frac{R_{rst}^{*2}}{Z_{st}^{*2}}(1-s_N)$$

5.4　起动时间计算

感应电动机的起动时间 t_{st} 与电动机的加速转矩 T_a 和被驱动机械（机组）的飞轮力矩 GD^2 有关。

机组的机械时间常数为

$$T_j=\frac{GD^2n_s^2}{365\times10^3P_Ng}\quad(s)$$

式中，GD^2 为机组的飞轮力矩，N·m²；n_s 为电动机同步转速，r/min；P_N 为电动机额定功率，kW；g 为重力加速度，m/s²。

利用电动机和负载的转矩曲线（见图 3.3-9）可按下式计算起动时间

$$t_{st}=T_j\left(\frac{\Delta s_1}{\overline{T}_{a1}}+\frac{\Delta s_2}{\overline{T}_{a2}}+\cdots+\frac{\Delta s_n}{\overline{T}_{an}}\right)=\Delta t_1+\Delta t_2+\cdots+\Delta t_n\qquad(3.3\text{-}2)$$

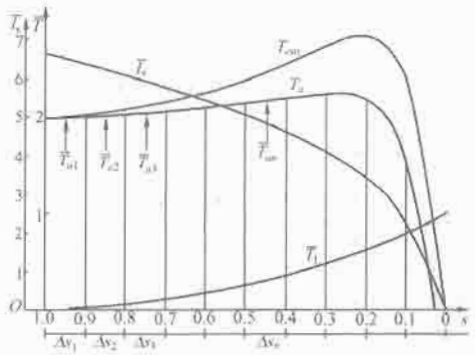


图 3.3-9　感应电动机和负载的转矩曲线

上式中的 Δs 系将转矩曲线分成 n 个等分或不等分区间求得

$$\Delta s_n=s_{n-1}-s_n$$

$\overline{T}_{an}$ 为加速转矩，在每一个小区间内，$\overline{T}_{an}$ 可认为近似不变

$$\overline{T}_{an}=\frac{T_{em}-T_L}{T_N}=\overline{T}_{em}-\overline{T}_L$$

式中，T_{em} 为电动机的电磁转矩，N·m；T_L 为负载阻转矩，N·m；T_N 为电动机额定转矩，N·m。

5.5　起动温升计算

5.5.1　定子绕组起动温升计算

由于感应电动机起动时间很短，定子绕组与铁心之间的热传递可忽略不计，则定子铜绕组起动温升 $\Delta\theta_s$ 可按下式计算

$$\Delta\theta_s=[250+(\theta_0-15)](e^{2.017\times10^{-5}J_{se}^2t_{st}}-1)\quad(K)$$

式中，θ_0 为定子绕组的初始温度，℃；J_{se} 为起动时的定子绕组等效电流密度，A/mm²。

由于在起动过程中定子绕组电流是不断变化的，所以起动时的定子绕组等效电流密度 J_{se} 可按以下方法计算：

定子绕组在起动过程中的等效电流为

$$\overline{I}_{se}=\sqrt{\frac{\overline{I}_{s1}^2\Delta t_1+\overline{I}_{s2}^2\Delta t_2+\cdots+\overline{I}_{sn}^2\Delta t_n}{t_{st}}}$$

式中，$\overline{I}_{s1}$，$\overline{I}_{s2}$，…，$\overline{I}_{sn}$ 分别为在起动过程中每个 Δs 区间内起动电流倍数的平均值；Δt_1、Δt_2、…、Δt_n 为每个 Δs 区间的起动时间，由式（3.3-2）求得。

起动时的定子绕组等效电流密度为

$$J_{se}=\overline{I}_{se}J_N\quad(A/mm^2)$$

式中，J_N 为定子绕组的额定电流密度，A/mm²。

5.5.2　笼型转子的起动温升计算

在整个起动过程中的导条等效电阻为

$$\overline{R}_B=\frac{R_{BN}+R_{BS}}{R_{BN}+R_{RN}+R_{BS}+R_{RS}}$$

在整个起动过程中的端环等效电阻为

$$\overline{R}_R=\frac{R_{RN}+R_{RS}}{R_{BN}+R_{RN}+R_{BS}+R_{RS}}$$

式中，R_{BN}、R_{RN} 为额定运行时的导条和端环电阻，Ω；R_{BS}、R_{RS} 为堵转时的导条和端环电阻，Ω，且

$$R_{RN}=R_{RS}$$

因起动时间较短，导条温升 $\Delta\theta_B$ 和端环温升 $\Delta\theta_R$ 也可按绝热状态计算

$$\Delta\theta_B=\frac{A_r\overline{R}_B}{\rho_Bc_BV_B}\quad(K)$$

$$\Delta\theta_R=\frac{A_r\overline{R}_R}{\rho_Rc_RV_R}\quad(K)$$

式中，ρ_B、ρ_R 为导条和端环的密度，g/cm³；c_B、c_R 为导条和端环的比热容，J/（g·K）；V_B、V_R 为导条和端环的体积，cm³；A_r 为在起动过程中的转子损耗，J。

$$A_r=P_NT_j\sum_1^n\left(s_n\Delta s_n\frac{\overline{T}_{emn}}{\overline{T}_{emn}-\overline{T}_{Ln}}\right)\times10^3$$

6　通风温升计算

感应电机运行时产生的主要损耗均转变成热能，使电机发热。为了保证电机安全可靠地运行，需要采用不同的通风系统来保证电机的温升和最热点不超过允许值。因此，准确合理地进行感应电机的通风温升计算已成为现代电机设计必不可少的组成部分。

6.1　感应电机常用的通风系统和温升计算方法

根据冷却空气在电机中的主要流动途径，电机的通风系统可分为外通风（机壳表面冷却）和内通风两大类，其中内通风系统又可分为轴向通风系统、径向通风系统以及轴向—径向混合通风系统三种。

感应电机常用的通风系统如图 3.3-10 所示。

根据通风系统的特点可采用不同的温升计算方法。机壳表面冷却的电机一般采用等效热路法计算温升；内通风电机因风路情况较为复杂，宜通过求解温度场来计算电机温升。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

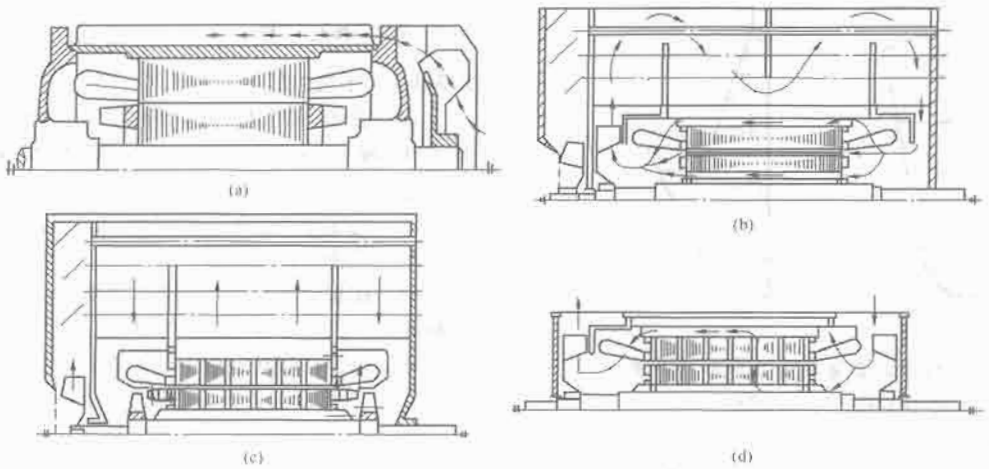


图 3.3-10 感应电机常用的通风系统
(a) 机壳表面冷却通风系统；(b) 轴向通风系统；
(c) 径向通风系统；(d) 轴向-径向混合通风系统

6.2 机壳表面冷却电机的通风计算

这种电机的通风计算比较简单。风扇空载静压 h_0 和短路最大风量 Q_m 可按下式近似计算

$$h_0 = 0.30 d_{f0}^2 (n/60)^{2.2}$$

$$Q_m = 0.45 \pi^2 d_{f0}^2 b_f n/60$$

式中，d_{f0} 为风扇外径；b_f 为风扇宽度；n 为风扇转速。

按能量平衡原理，风扇输出压头应等于各项动能损失之和

$$h_0(1 - Q_g^2/Q_m^2) = \Delta P_m + \Delta P_b + \Delta P_c + \Delta P_0$$

式中，ΔP_m 为风罩入口的动能损失；ΔP_b 为气流转弯的动能损失；ΔP_c 为过流截面缩小的动能损失；ΔP_0 为气流出口的动能损失。

由此便可求得电机外风路的冷却气流风量 Q_g 以及风罩出口风速和沿散热筋的气流速度。

6.3 机壳表面冷却电机的温升计算

计算这类电机的稳态温升时，可将电机的各主要部件按其结构型式和发热特点划分成许多网格（温度单元），热源集中于网格中心，各网格通过热导联系起来，使电机内部的温度场离散为等效热网络。通过网络求解，求得各部位的温度值。

图 3.3-11 是网格剖分的一种型式，剖分时要充分考虑到电机的结构、材料和工艺等因素，并假定电机温度沿圆周方向对称，因此，只要计算轴向剖面的温度即可。各区域中心为节点，相互间用热导联系起来，其中 a～f 共六个点为电机外表面冷却气流温度，作为计算的边界条件；节点 1、2 为轴承温度；节点 33、34 为电机内部空气温度。按图 3.3-11 构成的等效热路如图 3.3-12 所示。

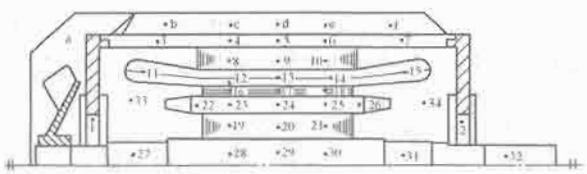


图 3.3-11 机壳表面冷却电机的温度场网格剖分和温度节点

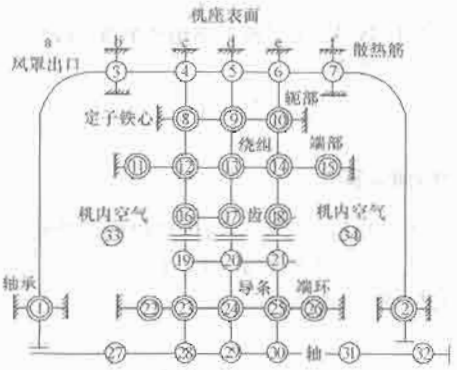


图 3.3-12 机壳表面冷却电机的等效热路
——热传导；┫对流散热；○—无源节点；
◎—有源节点

6.4 内通风系统电机的通风计算

内通风系统电机的通风结构比较复杂，由于通风方法不一，过流截面形状不规则，风道变化较多，再加上风量、风压、风阻三者之间的非线性关系，很难用简单的数学表达式来表示。因此，只能根据气流在电机各部位的流动特性，按等效风路的概念进行计算。对应电机的不同通风方式，可画出不同的等效风路，如图 3.3-13 所示。图中各部分风源和风阻代号的说明见表 3.3-4。

表 3.3-4 风压源和风阻代号说明

电机主风扇所产生的最高空载风压			h_{0fx}
转子径向风道所产生的最高空载风压			h_{0k}
转子端部或端环上风叶所产生的最高风压			h_{0rf}
转子导条间隙所产生的最高风压			h_{0bn}
机座入口风阻			Z_{fri}
冷却器罩风阻			Z_{hs}
转子风阻 Z_r	转子轴向风道入口风阻		Z_{ri}
	转子轴向风道沿程风阻		Z_{rl}
	转子轴向风道出口风阻		Z_{r0}
定子端部风阻 Z_{et}	定子压板通风孔风阻		Z_{fzw}
	绕组端部风阻 Z_{dbs}	端部直线部分风阻	Z_{ets}
		端部菱形部分风阻	Z_{etb}
		端部与风罩间隙处风阻	Z_{wbbi}
定子风阻	定子铁心背部沿程风阻		Z_{cl}
	机座出口风阻		Z_{fc}

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

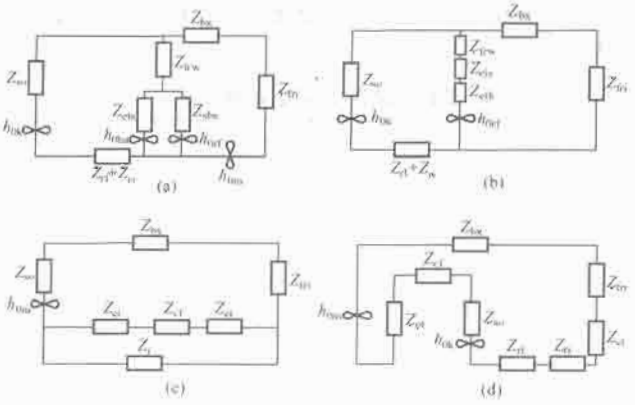


图 3.3-13　内通风系统电机的等效风路
（a）径向通风；（b）自通风；
（c）轴向通向；（d）混合通风

电机的内通风方式基本上为径向通风、轴向通风和混合通风三种，如径向通风方式省去主冷却风扇，由径向风道和转子风叶承担风压源的作用，便成为“自通风方式”。在求出风路各部分的风阻和风压元件参数后，对图 3.3-13 所示的对应各种通风方式的等效风路，根据回路定律 $\Sigma h=0$ 列出回路方程，按节点流量定律列出节点方程，以各支路的风量构成目标函数，将相应的网络方程代入目标函数表达式，便可求解通风方程组。

在求得各支路风量后，还可进一步求得各有效部位的风量和风速，主风扇和外风路风扇的工作点和消耗功率，冷却管内风速等，基本上可满足内通风电机温升计算的需要。

6.5　内通风系统电机的温度场计算

这类电机目前常用的温升计算方法是把电机内的分布热源、分布热参数看作几个集中热源和集中热阻，通过求解节点数较少的联立方程，得出集中热源处的平均温升。

由于电机内的最热点特别是线棒内的最热点常常是最易被击穿和老化的部位，因此，计算出最热点的位置和它的温升值对提高设计品质有重要的指导意义。但要计算出最热点的温升，就必须计算电机的三维温度场。

6.5.1　求解区域和边界条件

考虑到电机的对称性和沿定子外圆通风条件基本相同的特点，可以将求解区域缩小至下述范围：

1）轴向通风电机。圆周方向取半个齿距，轴向取电机的右端部到左端部，径向取转子铁心内圆到定子铁心外圆。

2）径向通风电机。圆周方向和径向与轴向通风电机的相同，轴向可取右端部（或左端部）到电机铁心的中部，即计算电机的一半长度。

求解区域的边界条件为：定子线棒的中心面、转子导条的中心面及铁心齿的中心面为绝热边界，定、转子铁心的轭部表面、铁心的端面、定转子线圈表面都是对流换热边界。此外，径向通风电机中的通风道铁心侧面也是对流换热边界。

6.5.2　物理数学模型

在构成电机的三维热导网络时，可将定子绕组端部和定、转子铁心（包括绕组在内）沿轴向剖分成若干段，每一段再剖分成若干单元。各单元之间、单元与边界之间的热导组成一个平面热导网络，段与段之间的平面网络各按其对应的轴向热导相互连接起来形成一个三维的热导网络（见图 3.3-14）。在轴向通风电机的物理模型内除了铜节点之间有轴向热导连接外，在齿、轭等铁节点之间也有轴向热导互相联系。在径向通风电机内，如果以一个铁心段（即两相邻通风道之间的铁心段）作为一个轴向分段，则只有铜节点之间有轴向热导联系。根据这一物理模型，应用傅里叶导热定律、牛顿散热定律和能量守恒定律，建立电机三维温度场数学模型。由于电机内部存在着多种各向异性的导热材料，又有多种交界面的缝隙，故采用积分形式的导热方程，并演变成三维的节点热流方程，以适用于电机内部的复杂情况和它的对流换热边界面。

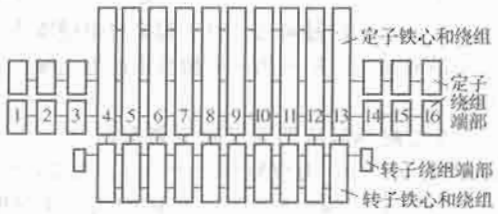


图 3.3-14　轴向通风系统感应电动机三维温度场物理模型

通过求解三维热导网络，就可以求得电机的三维温度分布，并可以找出定子主绝缘、定、转子导体、定、转子铁心内的最热点。如果最热点温升接近或超出绝缘等级规定的温升值，则设计人员可根据最热点的温升值及其位置采取结构上的或电磁方面的措施来修正设计。根据温度场计算给出的轴向各个平面网络内的温度分布，还可以分析各轴向段的热流状况，以进一步提高设计水平。

图 3.3-15 和表 3.3-5 是一台轴向通风电机的温度场计算结果。

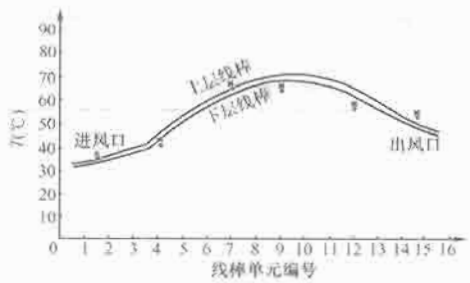


图 3.3-15　132kW 轴向通风系统感应电动机线棒温度分布
—计算值；×—上层线棒测量值；
○—下层线棒测量值
注：线棒单元编号对应图 3.3-14。

表 3.3-5　132kW 轴向通风系统感应电动机温升计算值　　单位：K

各种温升	计算值	试验值
槽壁中央铁心温升	66.7091	62.62
定子绕组平均温升	51.0735	50.47
定子绕组最热点温升	71.7204	66.76
最热点与平均温升之差	20.6469	16.29

7　噪声计算

感应电机运行时不可避免地会产生振动和噪声。振动、噪声水平反映了电机设计、制造的水平，是衡量产品品质的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

重要指标，在电机基础技术标准和感应电机产品标准中都有明确规定。现代电机设计要求在设计阶段预计电机实际运行时所产生的噪声，同时要掌握降低噪声的方法。因此，噪声计算已成为现代电机设计的重要组成部分。

电机主要噪声源及其分析参见本卷第1篇第7章第2节。

7.1 电磁噪声计算

7.1.1 径向电磁力

电磁噪声是由于电机气隙磁场相互作用产生径向电磁力，使定子振动而引起的气载噪声。由定子和转子谐波磁场相互作用产生的低阶次径向力，是引起电机电磁噪声的主要原因。由基波磁场产生的两倍于电源频率的振动噪声常见于两极电机中。

p 对极基波磁场幅值即为气隙磁通密度 B_δ，它产生的径向力波阶次 $m=2p$，力波频率 $f_r=2f_1$，力波幅值 $F_r=B_\delta^2/4\mu_0$，在铁心单位轴向长度上，气隙圆周一个极距内作用的径向力平均值为

$$F_m=\frac{2}{\pi}F_r\frac{\pi D_i}{4p}$$

式中，D_i 为定子铁心内径。

定、转子谐波磁场相互作用产生的径向力计算如下：

1）分析产生低阶次力波的谐波磁场。在分析给定槽配合的电机所产生的径向力阶次及频率时，应先计算并列出定子和转子谐波谱。例如，一台极数 $2p=4$，定子槽数 $Q_s=36$，转子槽数 $Q_r=32$，定子采用60°相带绕组的三相笼型感应电机的谐波谱见表3.3-6。表中定子谐波磁场次数 $\nu=(6k_1+1)p$，其中齿谐波磁场次数为 $\nu=k_1Q_s+p$；笼型转子谐波磁场次数 $\mu=k_2Q_r+\nu$，其中重要的谐波次数为 k_2Q_r+p。上述各式中，$k_1=\pm1,\pm2,\cdots$；$k_2=\pm1,\pm2,\cdots$。

表3.3-6 定、转子谐波谱

定子谐波 ν		转子谐波 μ				
k_1	ν	k_2	−1	+1	−2	+2
0	[2]		(−30)	(34)	[−62]	[66]
−1	−10		−42	22	−74	54
+1	14		−18	46	−50	78
−2	−22		−54	10	−86	42
+2	26		−6	58	−38	90
−3	(−34)		−66	−2	−98	30
+3	(38)		6	70	−26	102
−4	−46		−78	−14	−110	18
+4	50		18	82	−14	114
−5	−58		−90	−26	−122	6
+5	62		30	94	−2	126
−6	[−70]		−102	−38	−134	−6
+6	[74]		42	106	10	138

注 其中带□为基波，带（ ）为一阶齿谐波，带[]为二阶齿谐波。

按表3.3-6逐次分析确定定子和转子谐波磁场相互作用产生的低阶次力波，力波阶次 $m=\nu\pm\mu$。例如，$\mu=-30$ 与 $\nu=26$，-34 分别产生四阶力波；$\mu=34$ 与 $\nu=-34$ 产生零阶力波，与 $\nu=38$ 产生四阶力波等等。在定性分析或粗略估算时往往可只考虑由定子 p 次基波产生的转子谐波磁场。例如，$2p=4$，$Q_s=36$，$Q_r=32$，见表3.3-7所示，该表还可方便地列出相应于某定、转子谐波所产生的低阶力波阶次和频率。

表3.3-7 低阶力波阶次 m/力波频率 f_r

定子谐波 ν	转子谐波 μ			
	(−30)	(34)	(−62)	(66)
[2]				
−10				
14				
−22				
26	4/700			
(−34)	4/800	0/900		
(38)		4/800		
−46				
50				
−58			4/1600	
62			0/1500	4/1600
(−70)				4/1700
(74)				

注 1. 力波频率参见本卷第1篇第7章2.1.2节。

2. 表列频率为假定运行转差率为零时的值。

2）ν_b 次定子磁场与 μ_a 次转子磁场产生的力波幅值为

$$F_r=\frac{1}{2\mu_0}B_{\nu b}B_{\mu a}$$

式中，$B_{\nu b}$、$B_{\mu a}$ 为定、转子谐波磁场磁通密度幅值。一般情况下存在大量同阶次、同频率径向力波，它们的幅值及相位各不相同，各力波叠加后合成幅值为 F_{rs}，则在铁心单位轴向长度、电机气隙圆周一个极距下作用的径向力平均值为

$$F_m=\frac{2}{\pi}F_{rs}\frac{\pi D_i}{2m}$$

$$=F_{rs}\frac{D_i}{m}$$

7.1.2 定子振动特性

电机运行时，气隙中交变的径向电磁力波作用于定、转子铁心，使其发生振动，振动频率为径向力波的频率。因定子铁心呈薄壁环状，刚性较差，故定子振动是引起电磁噪声的主要原因。

精确计算电机定子振动特性的方法是能量法，计算时把定子作为多自由度振动系统，可对不同结构型式的定子进行分析计算。能量法基础是拉格朗日运动方程

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial X_m}\right)-\frac{\partial L}{\partial X_m}=F$$

式中，L 为系统动能 T 与势能 U 之差，$L=T-U$；X_m 为系统广义坐标，是一组描述系统运动状态的独立参数；F 为系统广义力。

由此导出振动系统运动方程

$$([\boldsymbol{K}]-\omega^2[\boldsymbol{M}])\boldsymbol{X}=\boldsymbol{F}$$

式中，$[\boldsymbol{K}]$ 为刚度矩阵；$[\boldsymbol{M}]$ 为质量矩阵；ω 为角频率；$\boldsymbol{X}$ 为广义坐标列矢量；$\boldsymbol{F}$ 为非保守广义力的列矢量。

当广义力为零时可求出系统各阶固有频率和模态，然后可用振型叠加法计算系统对激振力的响应。

近似计算往往忽略机座的影响，定子简化为仅有定子铁心的单环型式，且只考虑铁心轭部变形。作为简支梁的定子轭受到正弦分布力作用下的弯曲变形，变形量为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$d_s = \frac{3}{4}\frac{F_m}{E}\left(\frac{D_c}{h_c}\right)\frac{1}{m^3}\times 10^4 \quad (\mu m)$$

对 $m=2$、3、4，可用下式计算

$$d_s = \frac{3}{4}\frac{F_m}{E}\left(\frac{D_c}{h_c}\right)\frac{m}{(m^2-1)^2}\times 10^4 \quad (\mu m)$$

式中，E 为铁心弹性模量；D_c、h_c 为铁心轭平均直径与轭高。

当铁心振动频率 f_r 接近固有频率 f_m 时，铁心变形量会增大，如果阻尼系数为 δ，则实际变形量为

$$d = \frac{d_s}{\sqrt{[1-(f_r/f_m)^2]^2+\left[(f_r/f_m)\frac{\delta}{\pi}\right]^2}} \quad (\mu m)$$

7.1.3　声辐射

声辐射计算依据是声压 p 的波动方程

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

式中，∇^2 为拉普拉斯算符；c 为声速。

根据电机结构尺寸与辐射波波长 $\lambda=c/f_r$（f_r 为声波频率）的相对大小关系，近似假定声辐射形式为平面辐射、球辐射或圆柱辐射。

对平面辐射，若声源振动的位移幅值为 d，振动角频率 $\omega=2\pi f_r$，则辐射体表面振动速度 $u_A=\omega d\times 10^{-6}$（m/s）。因此，平面辐射时声源表面处媒质声压有效值

$$p = \frac{1}{\sqrt{2}}\rho c\omega d \times 10^{-6} \quad (Pa)$$

式中，ρ 为媒质密度。

对空气媒质的平面辐射表面声强

$$I_p = \frac{p^2}{\rho c} = 830\pi^2 f_r^2 d^2 \times 10^{-12} \quad (W/m^2)$$

声强级

$$L_{Ip} = 10\lg\frac{I_p}{I_0} = 39.1 + 20\lg(f_r d)$$

对球辐射及圆柱辐射应在平面辐射基础上作修正。

7.2　轴承噪声

正常运行时轴承承受径向或轴向负荷引起周期性弹性变形而产生振动和噪声。轴承滚动面波纹度，滚动体、沟道表面损伤，轴承偏心，保持架、密封圈或防尘盖与其他零件摩擦，固体粒子进入轴承滚道等因素都会引起振动和噪声。同时电机轴承噪声受工艺因素影响很大，电机转子轴承档尺寸精度及端盖轴承室尺寸精度的不同，都会影响轴承的配合精度，导致电机振动噪声的差异。根据小型感应电机批量测试统计，按滚动轴承加速度级 L_A 可近似确定正常运行时电机轴承噪声声功率级为

$$L_{wb} \approx 14 + 0.9L_A \quad (dB)$$

7.3　通风噪声

电机通风噪声与采用的通风系统、风扇型式及尺寸、风路各部分尺寸等因素有关。一般认为风扇产生的涡流声与叶片外缘圆周速度六次方成正比，与风扇线性尺寸（外径与宽度乘积）的二次方成正比。

离心式风扇通风噪声声功率级 L_{wf} 与风扇结构尺寸及运行状况大致有如下关系

$$L_{wf} = 60\lg n_1 + 10\lg D_1 b - 25D_1 + 5\lg\frac{A_F}{A_0} + 20\lg\frac{N}{N_0} + 18$$

式中，n_1 为风扇叶片外缘圆周速度，m/s；D_1、b 为风扇叶片外径及宽度，m；A_F、A_0 为风扇进风口面积及基准面积，m^2；N、N_0 为风扇叶片数及模拟风扇叶片数。

8　结构设计

各种类型的感应电动机尽管结构有所不同，但都是由三部分组成的，即定子、转子和其他辅助部件。

定子由机座、定子铁心和定子绕组等组成，典型结构如图 3.3-16 和图 3.3-17 所示。

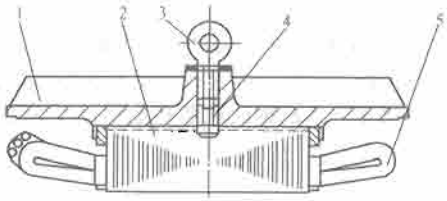


图 3.3-16　全封闭电动机定子
1—机座；2—定子铁心；3—吊环；4—紧定螺钉；5—定子绕组

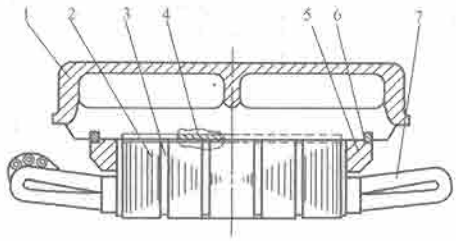


图 3.3-17　开启式电动机定子
1—机座；2—定子铁心；3—径向通风元件；4—圆销；5—压圈；6—弧键；7—定子绕组

转子由转子铁心、转子绕组、转轴和轴承等组成。转子绕组的型式有笼型和绕线型两类，其中笼型转子有铸铝和焊接铜转子两种，绕线转子有散嵌绕组和成型绕组两种。转子典型结构如图 3.3-18～图 3.3-20 所示。

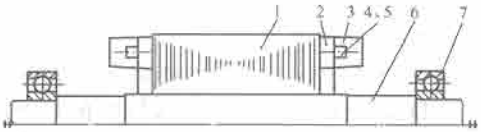


图 3.3-18　铸铝转子
1—转子铁心；2—端环；3—风叶；4—平衡柱；5—平衡垫圈；6—轴；7—轴承

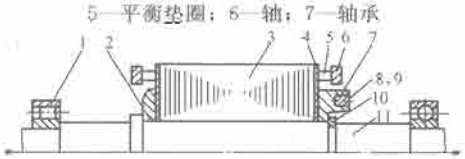


图 3.3-19　焊接铜转子
1—轴承；2—压圈；3—转子铁心；4—齿压板；5—铜条；6—端环；7—平衡架；8—平衡块；9—紧固螺钉；10—弧键；11—轴

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

其他辅助部件有端盖、接线盒、风扇和风罩等。

下面主要介绍定子和转子的结构。

8.1 机座

机座是支撑定子铁心和承担外壳防护作用的重要结构件。机座承受电机的重力，并承受通过定子传递的电磁转矩及单边磁拉力。通常用灰铸铁或铝合金铸造、钢板焊接，或用冲压的波纹钢板成形。

8.1.1 封闭式电机机座

封闭式电机机座应满足 IP44 及以上电机外壳防护等级的要求，详见 GB/T4942.1《旋转电机外壳防护分级》。机座设计要点如下：

1）常用的小型感应电动机的机座采用灰铸铁或铝合金铸造。对 0.55～15kW 的电机，壁厚取 6～10mm；对 18.5～100kW 的电机，壁厚取 10～15mm。为了消除机座的内应力，应对机座进行时效处理。

2）封闭式电机的热量是通过机座表面散发的。为了增加机座的散热面积，在机座外表面上设置散热筋，散热筋的分布、数量、尺寸等应根据通风散热效果及工艺要求确定。对 1kW 以下的小功率电机，如采用钢板或铝合金时，根据电机温升情况也可不设置散热筋；中型电机可根据需要，在机座上设置空气内循环的散热管或通风道。

3）为了保护定子绕组的端部，机座长度应尽量放长，使绕组端部不伸出机座外。机座内圆与铁心采用过盈配合，要求接触好，以增加热传导能力，并避免铁心与机座相对滑动。

8.1.2 开启式电机机座

开启式电机的机座应满足 IP33 及以下等级的要求。常用的 IP23 电机的机座设计要点如下：

1）机座内圆设置若干轴向或环形筋与铁心配合，使机座内圆与铁心外圆间形成空腔，作为电机冷却空气的通道。筋的数量与宽度根据机座刚度和通风要求确定。典型机座结构如图 3.3-21 所示。

2）电机冷却风路一般采用由端盖轴向进风，机座出风。机座出风口大小和位置应与端盖上的进风口大小和位置一并考虑确定。出风口的总面积应大于进风口的总面积，出风口的位置和结构应避免排出的热空气再从端盖进风口回到电机内部的可能性。

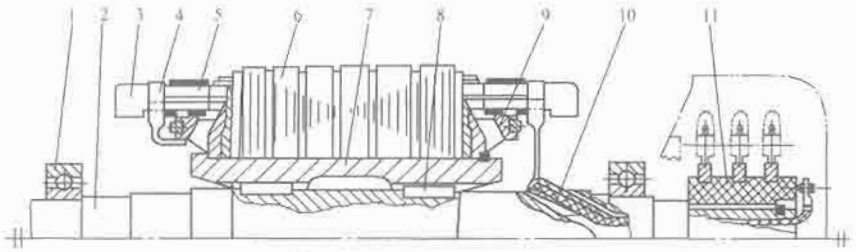


图 3.3-20 绕线转子

1—轴承；2—轴；3—风叶；4—导电环；5—转子绕组；6—转子铁心；7—转子支架；8—键；9—压圈（兼作平衡架）及平衡块；10—电缆；11—集电环

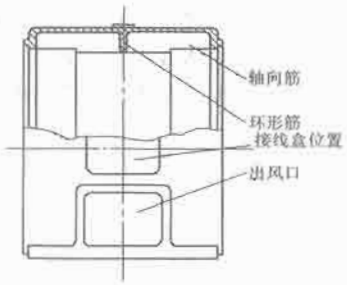


图 3.3-21 IP23 电机机座

3）机座与铁心配合的接触面积相对封闭式电机要小，因此，其配合的过盈量应适当增大或提高机座的加工精度。

8.2 定子铁心

定子铁心参见第 1 篇第 4 章。

8.3 定子绕组

定子绕组参见第 1 篇第 4 章。

8.3.1 散嵌绕组

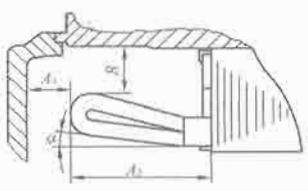
散嵌绕组主要用于小型电机。将电磁线绕成线圈后嵌到定子槽内，同时进行绝缘处理，使线圈与槽绝缘、槽内层间绝缘、端部相间绝缘、端部绑扎线以及槽楔等黏结成整体。这种绕组在绕线和嵌线过程中，导线的绝缘和槽绝缘易受到机械损伤。因此，电磁线的绝缘层除了应具有较好的电气强度外，还应具有较好的机械性能。另外，这种机械损伤的程度与铁心品质、槽满率高低及工艺操作水平等有关。散嵌绕组的技术要求如下：

1）根据电磁设计要求设计线圈绕线模，绕线模尺寸必须保证线圈的半匝长和跨距。绕线时必须保证匝数准确和导线排列整齐；绕线时应控制拉力，使导线不被拉细，漆膜不受损伤，必要时要测量电阻值。

2）根据设计要求，按电气原理图进行嵌线。嵌线时根据绝缘规范将槽绝缘、层间绝缘、相间绝缘垫好，并在槽口处用槽楔将线圈紧固。

3）线圈嵌线后，应对端部进行整形。对低压电机绕组端部，整形后相对位置尺寸应大于表 3.3-8 的数值。为了加强绕组端部的机械性能，端部必须绑扎。通常采用绝缘带或绝缘套管每隔 1～2 槽绑扎。对 2、4 极电机，还要在端部线圈的 1/3～2/3 长度内半叠包扎。

表 3.3-8 线圈端部相对位置及尺寸



功率（kW）	A_1（mm）	A_2	B（mm）	α（°）
≤18.5	15	电磁设计确定	10	3
22～55	20		15	5
75～160	25		20	5

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4）嵌线后对绕组进行浸漆和烘干，其目的是提高绕组的防潮性能和绝缘的整体性，同时提高绕组散热能力。因此，浸烘工艺和漆的性能直接影响到电机的温升和使用寿命。

5）绕组接线一般采用焊接，焊接的接头必须具有良好的导电性能和耐腐蚀性能，并采用绝缘带包扎后套上绝缘套管。引出电缆的另一头与接线片连接，一般采用冷压工具压接，并标注接线端标志。其标志的字母顺序与三相电源的电压相序方向相同时，从主轴伸端视之，电动机应为顺时针方向旋转。

8.3.2　成型绕组

成型绕组主要用于大中型电机。线圈预先成型后嵌到定子槽内，同时进行固定和绝缘处理。采用成型绕组的定子冲片槽形为开口槽或半开口槽，电磁线为扁铜线。成型绕组的主要特点如下：

1）根据电磁设计的线圈长度和跨距设计菱形绕线模，将电磁线绕成菱形后，采用绝缘带包扎端部，疏包线圈槽部，再经拉形、烘热、冷压、分开等工序后，按电气线路图和绝缘规范要求嵌线、接线。

2）嵌线时，沿槽部高度方向如有间隙，则须用绝缘垫条垫紧，使线圈槽部在槽内固定。绕组端部线圈之间的间隔用端部绝缘衬垫垫紧，并且绝缘带绑牢。对转速较高或功率较大的电机，在绕组端部上应装有绝缘的端箍，以承受起动时冲击电流产生的作用力，然后进行绝缘浸漆处理和烘干。成型绕组的线圈槽部和端部固定的典型结构如图 3.3-22 所示。



图 3.3-22　线圈槽部和端部固定结构
(a) 槽部固定；(b) 端部固定

8.4　转子铁心和绕组（参见第 1 篇第 4 章）

8.4.1　笼型转子

一般用途的感应电动机常采用铸铝转子；大中型电机或具有特殊性能要求的电机，则采用焊接铜转子。

1）铸铝转子。铸铝转子铁心由转子冲片叠成，并与导条、端环、转子风叶、平衡柱或平衡槽铸成一个整体。铸铝转子具有制造简单，节省工时等优点。端环的外径必须小于转子外径，风叶的长度一般取定子绕组端部长度的 2/3。转子有径向通风时，为了防止在通风道处漏铝，应采用封闭的通风道管。通风道管的形状与槽形相仿，尺寸略大，并在转子轭部处加通风槽片支撑，其结构如图 3.3-23 所示。

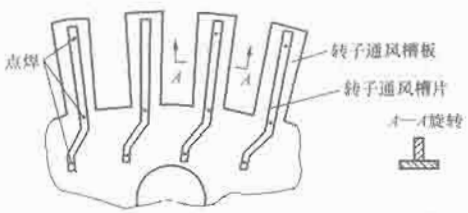


图 3.3-23　转子径向通风槽片结构

2）焊接铜转子。将冲片叠压在轴上，两端用齿压板、压圈以及弧键轴向压紧，然后将铜导条插入槽内，并与端环焊接。端环一般采用扁铜板加工成型。转子铜条和端环受热应力、离心力及电磁振动力等作用，因此，铜条和端环的焊接必须牢固，导条与槽形尺寸配合间隙尽量减小，并应有紧固措施。

8.4.2　绕线转子

绕线转子由导线绕成的线圈嵌入转子铁心槽内，并装有集电环、电刷等部件。转子绕组的引出线一般通过转轴中心孔接到集电环上。

1）转子绕组。转子绕组型式有散嵌绕组和成型绕组两种。散嵌绕组用于小型电机，线圈采用圆铜线或扁铜线绕成，其绕组的主要特点基本上与定子散嵌绕组相同。所不同处主要在固定转子绕组端部时，采用端部支架支承。转子成型绕组主要用于大中型电机，先制成一端端部成型的插入式半线圈，并包带绝缘，或环氧粉末涂敷。另一端端部在沿轴向插入半闭口槽内后成型，并连接成绕组。转子铁心结构与焊接铜转子基本相同。半线圈插入槽内时按绝缘规范的要求将槽绝缘、层间垫条、槽底垫条等垫好，用槽楔紧固。在嵌线后槽内如有间隙，则必须用绝缘纸板塞紧。线圈边槽部结构如图 3.3-24 所示。绕组端部采用支架支承，端部与支架间必须绝缘。两半线圈端部用并头套焊牢，如图 3.3-25 所示，有时转子风叶与线圈一起用并头套固定。



图 3.3-24　线圈边槽部结构
1—槽楔；2—槽绝缘；3—线圈；
4—层间垫条；5—槽底垫条

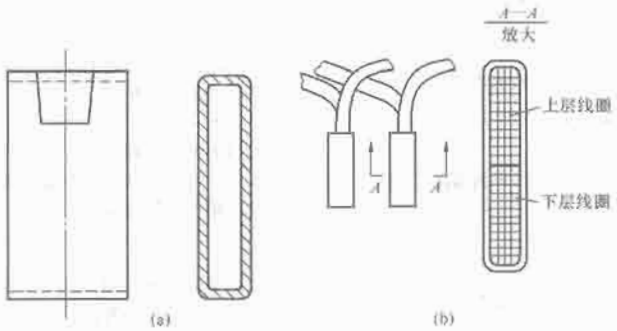


图 3.3-25　并头套及其并牢结构
(a) 并头套；(b) 线圈并接

2）集电环与电刷结构。绕线转子集电环固定在转子的轴上，电刷通过刷杆等部件固定在防护罩或定子其他部位上。集电环与电刷固定结构如图 3.3-26 所示。集电环的材料应具有较好的导电性和机械强度，常用铜合金或低碳钢，对高速电机则用合金钢。集电环的尺寸根据电刷的大小和数量确定，并符合有关标准的规定。集电环可以直接热套在包扎绝缘的轴上，或和热固性塑料连成一整体并固定在轴上。设计集电环在轴上的位置时应考虑集电环散热，并要考虑在电机运行时由于电刷磨损而产生的粉尘不致影响电机正常使用。电刷结构由刷盒、刷握、刷辫、接头、弹簧、弹簧夹等零件组成。电刷的型式、尺寸和数量根据转子电流大小确

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

定。

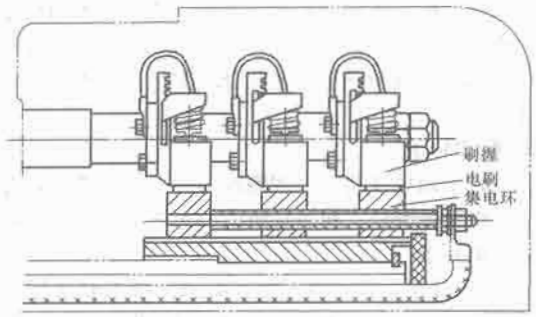


图 3.3-26 集电环与电刷结构

8.5 转轴（参见第1篇第4章）

确定转轴的尺寸及公差时，应综合考虑转轴上各零部件的安装位置及其固定方式、转轴的材料、转轴的强度和刚度以及加工工艺要求等因素。两轴承支承的卧式电机典型转轴的各分段尺寸及精度见表 3.3-9 及图 3.3-27。

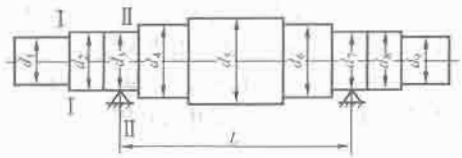


图 3.3-27 转轴各分段示意图

表 3.3-9 转轴尺寸确定（见图 3.3-27）

代号	部位名称	说明
d_1	轴伸档	进行强度计算，验算危险截面Ⅰ-Ⅰ应力，并应符合标准 GB/T 4772《旋转电机尺寸和输出功率等级》
d_2	轴承外盖或密封零件配合面	根据轴承尺寸和密封结构确定。基本尺寸通常与轴承档相同，加工精度比轴承档低，间隙配合
d_3	轴承档	经轴承寿命计算与转轴强度计算确定尺寸，危险截面为Ⅱ-Ⅱ
d_4	轴承内盖配合面	与轴承内圈配合的轴肩尺寸符合轴承安装要求，并考虑轴承内盖或注油结构。加工精度同部位 d_2
d_5	铁心配合面	按刚度计算和电磁设计结果确定。加工精度根据轴与铁心配合形式确定
d_6	轴承内盖配合面	同部位代号 d_4
d_7	轴承档	由轴承寿命计算确定。设计时常选用与部位 d_3 相同的尺寸，根据轴承寿命计算结果通常选用轻窄系列轴承
d_8	轴承外盖或密封零件配合面	同部位代号 d_2
d_9	外风扇配合面	通常选用比轴承档或部位 d_8 尺寸小 3～5mm 的直径，并考虑派生双轴伸电机。加工精度取 h7 或 h8 公差带
L	两轴承支承间距	在总体结构设计时，根据电机零部件分布确定 L 尺寸。由于 L 尺寸对轴的刚度有较大影响，因此尽量取小

8.6 轴承结构

轴承结构参见第1篇第4章。

8.6.1 轴承的固定

设计轴承固定结构时，应保证轴承在轴向和径向定位可靠，并选择经济合理的配合精度。

1）轴承定位结构。在轴承承受径向负荷或轴向负荷时，轴承相对于轴或端盖不得产生径向或轴向移动。轴承径向固定一般采取过渡或过盈配合。轴向定位结构根据作用在轴承上负荷的大小和方向、转速的高低、轴承在轴上的位置等因素确定。

2）轴承配合精度。轴承内圈与轴、轴承外圈与轴承室的配合及其精度一般采用过渡或过盈配合。但过盈太大会减少甚至消除轴承本身的径向游隙，从而可能使轴承噪声增加，甚至在安装轴承时损坏轴承。常用的配合精度见表 3.3-10。

表 3.3-10 常用轴承配合

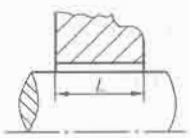
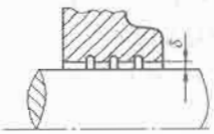
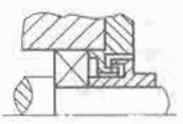
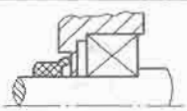
部位名称	轴（钢）	轴承室（铸铁）
公差配合	对外径 100mm 及以下取 k5 或 k6，其他取 m5 或 m6	对内径 100mm 及以下取 H6 或 H7，其他取 J6 或 J7

8.6.2 轴承润滑和密封

电机所采用的润滑剂为润滑脂，极少数特殊电机采用润滑油作为润滑剂。选用润滑脂时应考虑它的黏度、滴点、针入度、氧化安全性和低温性能。轴承在工作温度下，对球轴承润滑脂的黏度要求不低于 13mm²/s，对滚柱轴承不低于 20mm²/s。润滑脂的滴点应比轴承工作温度高 10～20℃。

为了使轴承保持良好的密封性和正常使用，必须防油脂泄漏、防尘、防水以及防止其他有害物质侵入轴承内。常用的轴承密封结构见表 3.3-11。

表 3.3-11 轴承密封结构

结构示意图	说明
	在轴与轴承盖的配合面之间保证很小的间隙，适当加长 l 尺寸，一般取大于 10mm。适用于比较清洁的工作环境。一般用于 IP44 及以下等级的小功率电机
	在端盖或轴承盖配合面上，加工若干条沟槽，并保证其配合间隙 δ 很小。适用于 IP44 及以下等级的大机座号电机
	端盖和轴套的间隙形成迷宫结构来达到密封效果。曲路折回次数越多，密封性越好。适用于粉尘较多的或要求防止腐蚀性气体进入电机内部的电机
	橡胶密封件直接与轴、端盖或轴承盖面接触（也可以点接触）。这种密封结构使电机摩擦损耗增加，因此只用在对密封要求较高的电机

8.7 转子平衡

由各零部件装配成的转子，由于材质分布不均匀或制造精度等因素的影响，转子需校平衡，以免转子在转动时产生附加的离心惯性力。转子经平衡后残留不平衡量应低于允许

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

值。转子平衡方法有动平衡和静平衡两种，一般电机均采用动平衡，对转速较低的电机可校静平衡。

转子平衡精度指转子经平衡后残留不平衡量的大小，以单位质量许用不平衡量 e 来表示，e 的限值见表 3.3-12，其计算式为

$$e=\frac{Gr}{G_r}\quad(\mu m)$$

式中，G 为不平衡量，g；r 为不平衡量离旋转轴线的距离，mm；G_r 为转子质量，kg。

表 3.3-12　　转子许用不平衡量

同步转速（r/min）	3000	1500	1000	750
e（μm）	8	16	24	32

9　计算机辅助设计

9.1　计算机辅助设计系统

感应电机的计算机辅助设计（CAD）是指用计算机系统来进行感应电机的电磁设计和结构设计，它包括电磁计算、通风温升计算、振动噪声计算、机械强度和刚度计算等软件，同时可绘制电机总装图和零部件图。感应电机的计算机辅助设计系统由硬件系统和软件系统组成，如图 3.3-28 所示。

近年来，微型计算机（简称微机）的应用有了迅速的发展。由于微机的体积小、价格便宜、灵活性大，以微机为基础的 CAD 系统在我国已逐步推广应用。在构成微机 CAD 系统时，用户可根据需要对图 3.3-28 中的应用软件进行增删。但一般来说，电磁计算软件和绘图软件是其中的核心部分，因此，下面主要介绍这两个方面的内容。

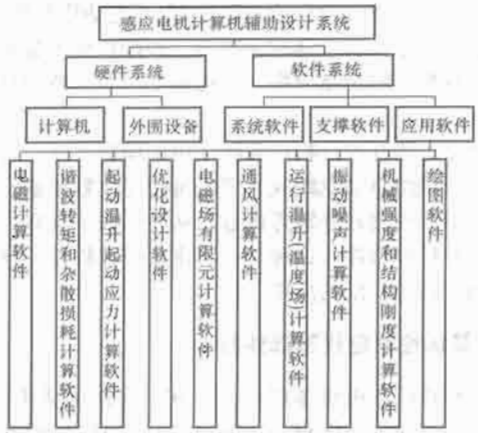


图 3.3-28　感应电机 CAD 系统

9.2　计算机辅助电磁设计

计算机辅助感应电机电磁设计有设计分析、综合设计和优化设计程序等三类软件。

图 3.3-29 是在国内普遍采用的中小型三相感应电动机电磁计算程序基础上编制的设计分析程序框图，它由下列三个部分组成：

1）磁路计算部分。包括磁动势计算框、励磁电流和励磁电抗计算框。

2）运行特性计算部分。包括运行阻抗计算框、满载电流和电动势计算框、损耗计算框、力能指标和过载能力计算框。

3）起动特性计算部分。包括饱和效应计算框、集肤效应计算框、起动电流和起动转矩计算框、转矩转速特性曲线计算框、起动时间计算框、起动温升计算框。

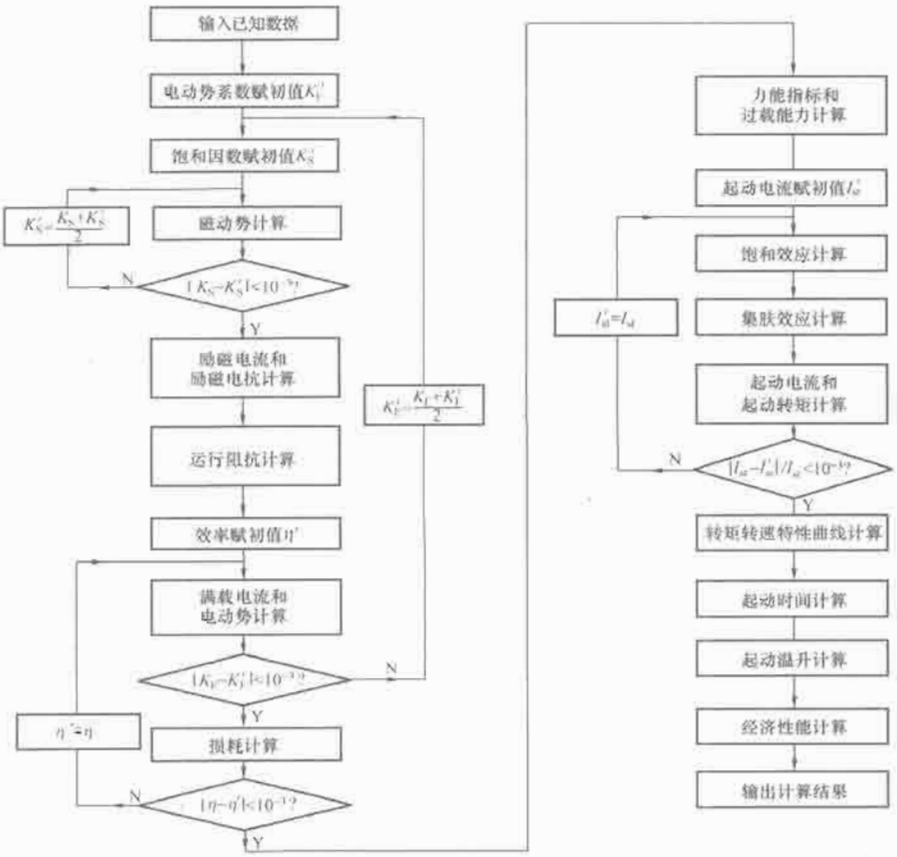


图 3.3-29　三相感应电动机电磁设计分析程序框图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

上述三个计算部分以饱和因数 K_S、电动势系数 K_E、效率 η、起动电流 I_{st} 四个迭代为纽带，并配以输入数据框、经济性能计算框、输出结果框，便构成了一个完整的分析计算程序。

实际上，现在的分析计算程序中还增加了定、转子开槽计算，定子绕组自动选线规，定子每槽导体数和定子铁心长度依一定的步长循环计算等内容，从而构成了具有一定综合功能的分析计算程序，这种软件和优化设计软件，目前在国内已得到了较为广泛的应用。

9.3 计算机绘制电机零部件图

用计算机绘制电机零部件图可在工作站或微机上实现，目前可应用的绘图软件很多，其中 AutoCAD 是较有代表性的一种，它不仅可以绘制二维图形，也可以绘制三维立体图形。

应用 AutoCAD 绘制电机零部件图有以下几种方法：

1）参数化绘图。参数化绘图是用编程的方法，将电机结构尺寸参数化、规范化，以建立一个能绘图的数学模型。

采用参数化绘图时，首先要建立接口程序，把 AutoCAD的实体绘图命令编成子程序，然后建立结构数学模型，用规范化的参数进行数学处理，以调用接口程序来实现绘图。数据可以从事先建立的数据库中读取，也可以从电磁设计或优化设计结果的数据文件中读取，或由设计人员通过键盘输入。当启动 AutoCAD 时，指定调用的命令文件名，整个绘图过程就可以自动完成。对于一些结构形状相似、仅尺寸大小不一的图形，如定、转子冲片，定子铁心，铸铝转子等，用参数化绘制更显得方便。用参数化绘图的具体过程如图 3.3-30 所示。

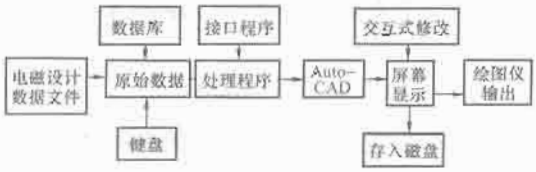


图 3.3-30 参数化绘图流程图

2）交互式绘图。所谓交互式，就是采用人机对话的方式在屏幕上绘出图形。用键盘或数字化仪菜单输入命令，根据屏幕提示输入参数。对基本不受电磁方案影响的零部件图，如轴承前后盖、端盖的铸件和加工图等，采用交互式绘图较好。

在交互式绘图时，采用 AutoLISP 开发电机通用零部件的子模型，如转轴、机座散热筋、机座底脚、接线盒、吊环绕组以及标准紧固件等，可进一步提高交互式绘图的效率。

3）积木式绘图。任何复杂的电机结构图形都是由简单的图形组合而成的，一些复杂的图形虽然也可以用交互式或参数化编程的方法绘制，但要做到熟练应用，还需经过一定的专门学习和训练。如果建立一种专供绘制电机零部件的图形库，在绘制电机整体结构图形时，只要将各种基本图形块如同搭积木一样组合起来即可，然后装上标准紧固件，就可完成部件图和总装图的绘制。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 4 章　感应电动机的起动、制动和调速

1　感应电动机的起动方法

当感应电动机的定子绕组投入电网，从 $t=0$，转速 $n=0$（$s=1$）时刻起，到转子转速达到额定转速为止的全过程是电机的起动过程。影响这一过程特性的主要因素是电机的初始起动电流（堵转电流）和起动转矩（堵转转矩）。对于不同转子结构型式的电动机有不同的起动特性，例如，有笼型与绕线型；笼型中又有单笼、双笼；单笼中又有一般笼和深槽笼等，它们各有不同的转矩转速特性，图 3.4-1 为不同的笼型转子电动机 $T_{em}=f(n)$ 特性。

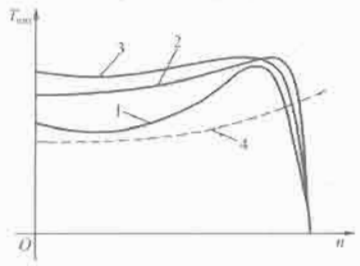


图 3.4-1　笼型转子电动机的 $T_{em}=f(n)$ 特性
1—一般单笼；2—深槽单笼；
3—双笼；4—负载机械特性

根据转矩平衡方程

$$T_{em}-(T_2+T_0)=J\frac{\partial\Omega}{\partial t}$$

式中，T_2 为与输出功率相对应的负载转矩；T_0 为与风摩耗 P_{fw} 和附加损耗 P_s 相对应的空载转矩；$\Omega=2\pi n/60=(1-s)\Omega_s$ 为转子旋转机械角速度；J 为转子的转动惯量。

可见，为了能顺利加速起动电机到额定转速，电动机的初始起动转矩和最小转矩与负载的机械特性应合理匹配，使整个起动过程中必须保持有正的加速度 $\partial\Omega/\partial t$。电磁转矩与负载转矩的差额越大，加速越快。起动最初瞬间转差率 $s=1$，由等效电路可知，电动机对电网呈现为短路阻抗。对于一般感应电动机短路阻抗的标么值为 $Z_k^*=0.14\sim0.25$，因此，在额定电压下直接起动，起动电流可达额定电流的 4～7倍。起动电流大还会造成如下影响：一方面使电源电压在起动时下降，特别是电源容量较小时电压下降更大；另一方面大的起动电流会在线路和电机内部产生损耗而引起发热，尤其对于惯量大的机组，起动时间长，发热影响更大。为此，在满足起动转矩要求的前提下，应尽可能降低起动电流。对于起动特别困难的场合，多采用绕线转子感应电动机，因为转子回路串接电阻，既可获得高的起动转矩，又能降低起动电流。

1.1　笼型电动机的起动方法

除了小容量电动机采用直接起动外，一般均采用降低电压起动。常用的降压起动方法有三种：定子串电抗（或电阻）降压起动；Y-△起动器起动；自耦变压器起动。

1）定子串电抗起动。在定子绕组侧串联电抗或电阻都能降低起动电流，但串电阻起动能耗较大，只用于小容量电机中。一般都采用定子串电抗降压起动。

2）Y-△起动器起动。只有电动机正常运行时定子绕组采用△联结，且三相绕组首尾六个端子全部引出的电动机，才可以采用 Y-△起动器起动。起动时，定子绕组先按 Y 联结，待转速增加到接近额定转速时，再改换为△联结。

3）自耦变压器起动。起动感应电动机的自耦变压器又称为起动补偿器。如图 3.4-2 所示为自耦变压器降压起动原理图，起动时先将开关 S 投向“起动”位置，合上电源开关后，则自耦变压器 T 的三相绕组接入电网电源，其二次侧抽头连接电动机，使电动机降压起动。当转速接近正常运行转速时，将开关 S 投向“运行”位置，则电机接入全电压（此时自耦变压器 T 已脱离电源），继续起动，但此时电流冲击已经较小。再经过一段时间，电机进入正常运行状态。

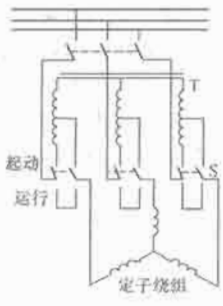


图 3.4-2　自耦变压器降压起动原理图

4）电力电子变换器“软起动”。利用现代电力电子变换器的交流调速技术可实现感应电动机的“软起动”。这种起动装置实际上就是一种带限流环节的调压调速装置，其主电路通常采用负载为 Y 联结的由晶闸管构成的相控交流调压系统，同时采用带电流限制环节的速度单闭环控制，图 3.4-3 表示软起动装置的系统构成。这种起动方法的最大优点是可实现无电流冲击地平滑起动，起动电流的最大值可以严格限定在所需的整定值之内。对于中等容量以上的感应电动机，如果仅作起动而不作调速应用，这种起动装置还是比较经济的。表 3.4-1 给出各种起动方法的比较，表中 I_{st}/I_N 为采用降压起动与直接起动比较起动电流降低倍数；T_{st}/T_N 为起动转矩降低倍数。

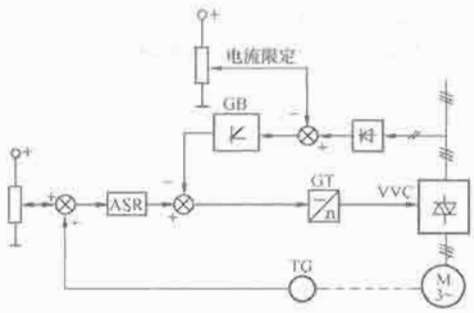


图 3.4-3　软起动装置的系统构成

表 3.4-1　　各种降压起动方法的比较

降压方法	$U_X/U_{\varphi N}$①	I_{st}/I_N	T_{st}/T_N	起动设备
串电抗（电阻）	$1/a$	$1/a$	$1/a^2$	较贵，较重
Y-△起动器	$1/\sqrt{3}$	1/3	1/3	最便宜，只限于定子△接的电机

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

降压方法	$U_X/U_{\varphi N}$①	I_a/I_N	T_{st}/T_N	起动设备
自耦变压器	$1/a$ 分级可调	$1/a^2$	$1/a^2$	最贵，通常有三个抽头可调，笨重
电力电子变换器软起动	随 $1/a$ 平滑变化	按给定值限定电流	随 $1/a^2$ 平滑变化	较贵，较轻，易实现自动化

①表中 a 为电网电压对施加给电机的端电压之比，即 $a=U_{\varphi N}/U_X$。

1.2 绕线转子感应电动机的起动方法

绕线转子感应电动机起动时，转子回路可通过外接变阻器，以减小起动电流同时提高起动转矩。随着电机转速的上升，逐步减小变阻器的阻值，直至最后完全切除变阻器，为了减少电刷与集电环的磨损，通常电机设有提刷装置，起动完毕后将电刷提起同时将绕组短路。转子回路接入变阻器的方法有如下几种：

1）起动变阻器。对于小功率电动机一般用三相空冷式变阻器或油浸式变阻器，对于较大功率的电动机则采用水电阻。图 3.4-4 表示转子回路接入变阻器时的机械特性。

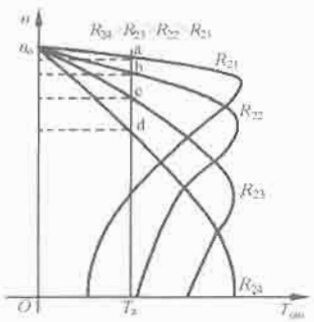


图 3.4-4 转子串电阻的机械特性

2）频敏变阻器。此种变阻器是一种无触点电磁器件，实质上这是一种带实心铁心的三相电抗器，接入转子回路后，起动时，转子绕组电流的频率为 f_1，铁心内磁通变化的频率也为 f_1，由于集肤效应引起铁心涡流损耗的等效电阻很大，随着转子转速的上升，转子电流频率自动下降，铁心涡流损耗逐渐减少，等效电阻自动平滑减小，实现电动机平稳地起动，直至最后切除。

3）谐波起动法。这是建立在交流绕组变极理论与方法上的一种绕线转子感应电动机的起动方法，实际上是一种定子与转子均采用改变绕组连接方式而改变极数的电动机。定子绕组设计成两种接线方式："起动"和"运行"。当按"运行方式"连接投入电网时，电机运行于某一种极对数下（例如少极对数）的很强磁动势建立的基波磁场，即是电机的工作磁场；当按"起动方式"连接投入电网时，定子绕组产生另一种不同于基波极对数（例如多极对数）或几种极对数的很强磁动势，建立起动用磁场，称为谐波磁场。转子绕组采用特殊设计的连接方式，使之能适应基波和谐波磁场感应电流的流通，并有各自的回路。"起动方式"下的谐波磁场的感应电流回路有较大电阻，而"运行方式"下基波磁场的感应电流回路有较小电阻，这样，以满足应有大起动转矩和小起动电流的要求。转子绕组可采用"多段联结法"使之与外接起动电阻相连，也可采用"叠加法联结"，通过改变定、转子绕组匝数比来提高转子电阻折算值，以达到改善起动特性目的。当转速上升到接近额定转速时，定子绕组从"起动方式"切换至"运行方式"后，则谐波磁场即被消除，电动机在基波磁场下正常运行。谐波起动法可以取消集电环和电刷，节省材料、缩小体积，提高了运行可靠性。

2 感应电动机的电磁制动方法

电机运行于电动状态（即机械特性的第Ⅰ象限）时，其电磁转矩 T_{em} 的作用方向与转速 n 的方向一致，均为正方向，即 $T_{em}n>0$，电机对外输出机械功率。若电磁转矩 T_{em} 的作用方向与转速 n 的方向相反，即 $T_{em}n<0$，电机工作在电磁制动状态（即机械特性的第Ⅱ、第Ⅳ象限）。在此状态下，电动机从外部吸收机械功转换成电功率。电磁制动的实际应用是，在某些场合下，要求电机很快停转或限制转速不致过高。通常有下列制动方法。

2.1 回馈制动

回馈制动又称再生制动或发电制动。当转子在外转矩作用下使其转速超过同步转速时，电机处于发电机状态，电磁转矩对外转矩为制动性质。发生回馈制动有两种情况：一种是稳态回馈制动运行，电动机由负载拖动而超过同步转速旋转，如电动机拖动的起重机下放重物、电动汽车下坡限速制动，即属于此种运行状态；另一种为非稳态回馈制动运行，如变频调速时，电动机原运行在某一频率下，若突然降低变频器的输出频率至另一频率，则电动机的机械特性发生改变，由于电机的机械惯性，转速不能突变，转子的转速高于定子旋转磁场的转速，电磁转矩变为制动性质，电机工作在降低频率后的机械特性上，电磁转矩和负载转矩同时使转子转速下降，直至在另一转速下稳定运行，其中有一段运行过程即属于非稳态回馈制动状态。这种同样性质的回馈制动还发生在变极调速时由少极数切换到多极数状态，如双速电梯的减速制动。图 3.4-5 给出三种回馈制动运行状态。

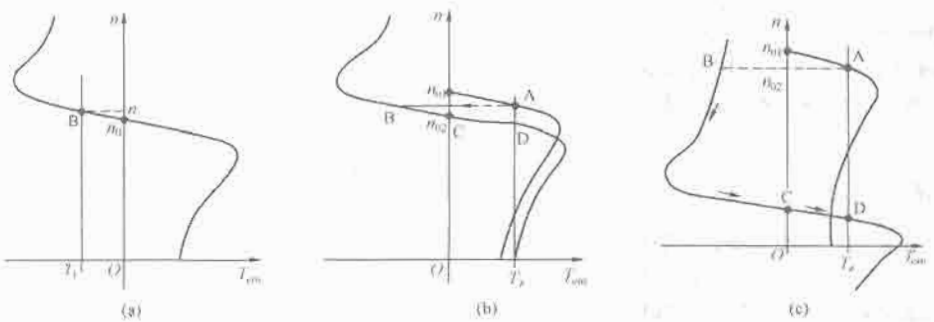


图 3.4-5 感应电动机的回馈制动

（a）稳态发电回馈制动；（b）变频调速回馈制动；（c）变极调速回馈制动

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.2　反接制动

实现反接制动有两种方法：转子转速反向和定子相序反接。当定子相序不变，转子反方向旋转，用于起重机的绕线转子感应电动机，转子回路串接较大电阻下放物体时的状态即属于第一种制动法。如转子旋转方向不变，将定子绕组的任意两相改变相序，则旋转磁场改变方向，在转子上产生制动转矩，电机将很快停转，如不及时切断电源，电动机将反转运行。此种制动方法电流冲击较大，一般只用于小容量电动机。

2.3　能耗制动

将正在运行的电动机的定子绕组从电网断开，使其中两相迅速接到直流电源上，由于定子中流过直流电流，定子形成一恒定磁场，转子因惯性继续转动，其导条切割恒定磁场而在转子绕组中感应电动势和电流，从而将转子动能变成电能消耗，转子因而发热，当转子动能消耗完，转子即停止转动，这一过程称为能耗制动。

另外也可采用异步发电方法进行能耗制动。当定子绕组从电网断开后，将三相定子端迅速接入由电容和电阻组成的三相并联负载上，只要铁心存在剩磁，并联电容器提供发电机的励磁，转子因惯性继续旋转在定子绕组感应电动势，此时定子端电压加在电阻上产生电流而变成焦耳损耗，电机将随着转子动能的耗尽而停转。

能耗制动方法通常用于不可逆转的驱动系统和停转后才允许反转的可逆转驱动系统中。

3　感应电动机的调速方法

根据感应电动机的转速公式

$$n=(1-s)n_s=\frac{60f_1}{p}(1-s)$$

感应电动机的调速方式有三种：① 变极调速；② 变频调速；③ 改变转差率 s 调速。

3.1　变极调速

在恒定电网频率下，电机内旋转磁场的同步转速与定子绕组极对数成反比，改变绕组的连接方法可以改变极对数从而获得两种或两种以上的转速，这是一种逐级而不能平滑的调速方法。这种调速方法通常适用于笼型转子电机，对于绕线型转子则比较复杂，很少采用。变极方案：定子可以设置两套绕组得到双速；也可以只设置一套绕组，采用改变连接方法从而改变绕组内部电流方向，可以得到两速或两种以上的转速。图 3.4-6 表示改变绕组连接从而改变半相绕组电流方向得到 4 极变成 2 极的基本原理。单绕组变极方法有多种多样，详细请参考本篇第 8 章。

3.2　变频调速

当转差率变化不大时，感应电动机的转速基本上正比于电源频率，可见，改变电源频率就能改变异步电动机的转速。变频调速时，总希望主磁通 Φ_m 保持不变。在忽略定子漏阻抗的情况下，有

$$U_1\approx E_1=4.44f_1N_1K_{dp1}\Phi_m$$

电磁转矩公式

$$T_{em}=C_{Tm}\Phi_mI_2\cos\psi_2$$

若定子端电压保持不变，频率减小，则主磁通增加，则磁路饱和而使励磁电流增大，功率因数降低，损耗增加；频率增大时，则主磁通减少，电机的电磁转矩下降，最大转矩也降低，当小于负载转矩时，电机可能停转。因此，变频调速应根据负载的不同要求，改变端电压与频率的合理配合关系。在额定频率以下调速时（$f_1<f_{1N}$），忽略定子漏抗压降，则只要 $U_1/f_1=C$，即可保持磁通不变。根据电机连续运行受散热条件限制，最大定子电流为额定电流，相应的转子也限制在额定有功电流，由于磁通不变，因此电动机的最大输出转矩不变，将这种调速称为恒转矩调速。在额定频率以上调速时（$f_1>f_{1N}$），为保证电机和电子元器件的安全，电压不宜随频率上升，此时定子端电压保持额定值，即 $U_1=U_{1N}$不变。而电磁转矩 $T_{em}\propto\Phi_m\propto1/f_1$，则电磁功率 $P_{em}=T_{em}\Omega_s$ 保持不变，将这种调速称为恒功率调速。图 3.4-7 表示感应电动机变频调速时的电压与频率的控制特性。

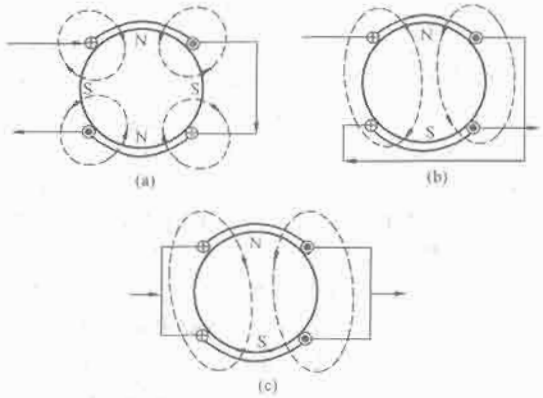


图 3.4-6　单绕组变极原理
（a）变前极 $p=2$；（b）变后极 $p=1$ 串联接法；
（c）变后极 $p=1$ 并联接法

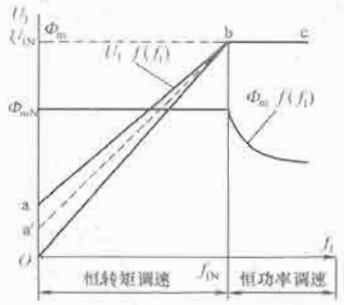


图 3.4-7　变频调速的电压—频率控制特性

3.2.1　恒转矩调速

由第 2 章基本原理的转矩特性可知，令 $\sigma_1=1$，有如下关系式

$$T_{em}=pm_1\left(\frac{U_1}{\omega_1}\right)^2\frac{s\omega_1R_2'}{(sR_1+R_2')^2+(sX_k)^2}$$

$$T_{max}=\frac{pm_1}{2\omega_1}\frac{U_1^2}{R_1+\sqrt{R_1^2+X_k^2}}$$

$$s_m=\frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2+X_k^2}}$$

式中，$X_k=X_1+X_2'$ 称为短路电抗。变频调速时，频率 f_1 与电压 U_1 均是可变的，定义变频比 α 为 $\alpha=f_1/f_{1N}$，f_{1N}为额定频率。当取 $U_1/f_1=C$ 控制方式时，有 $\omega_1=\alpha\omega_{1N}$，$n_s=\alpha n_{sN}$，$U_1=\alpha U_{1N}$，$X_k=\alpha X_{kN}$，下标 N 表示在额定频率下的物理量。用变频比为变量表示的电磁转矩和最大电磁转矩为

$$T_{em}=pm_1\left(\frac{U_{1N}}{\omega_{1N}}\right)^2\frac{s\alpha\omega_{1N}R_2'}{(sR_1+R_2')^2+(s\alpha X_{kN})^2}$$

$$T_{max}=\frac{pm_1}{2}\left(\frac{U_{1N}}{\omega_{1N}}\right)^2\frac{\alpha\omega_{1N}}{R_1+\sqrt{R_1^2+(\alpha X_{kN})^2}}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

由上式可知，当不计定子电阻时，最大转矩 T_{max} 与频率 f_1 无关，而同步转速亦即理想空载转速正比频率变化。这样，电机的转矩—转速特性随频率的下降是一组平移曲线，如图 3.4-8（a）所示。当计及定子电阻时最大转矩随频率降低而减小，如图 3.4-8（b）所示。采用 $U_1/f_1=C$ 的控制方式，仅适用于调速范围不大或负载转矩随转速下降而减小的如风机、泵类机械负载。对于调速范围大的恒转矩负载，则希望在整个调速范围内要求最大转矩不变，即按 $E_1/f_1=C$ 的方式进行控制。然而 E_1 是难以直接控制的，但可以根据定子额定电流和漏阻抗计算出来，由此可以得到电压补偿的 $U_1/f_1=C$ 关系，如图 3.4-7 中 ab 线段，当负载变化时，补偿后的电压关系在 ΔOab 内为不同线段如 a′b。

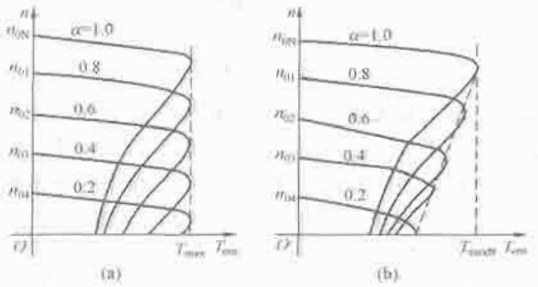


图 3.4-8 基频以下恒转矩变频调速转矩特性
（a）$R_1=0$；（b）$R_1\neq0$

3.2.2 恒功率调速

变频调速在额定频率以上调速时，定子电阻可以忽略。这样，对于恒功率变频调速在调速过程中保持电机的最大转矩不变时，端电压 U_1 与频率 f_1 有如下关系

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}}=\frac{U_N}{\sqrt{f_N}}$$

显然要保持 $U_1/\sqrt{f_1}=C$，必须使 U_1 超过额定电压，这是不允许的，通常维持额定电压不变，这样主磁通将小于额定磁通，最大转矩将下降。图 3.4-9 电压为额定值时频率向上调节时的转矩-转速特性。

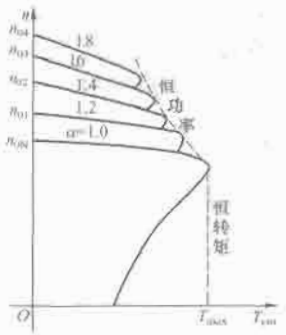


图 3.4-9 基频以上恒功率变频调速转矩特性

关于变频调速的详细情况请参考本篇第 7 章。

3.3 绕线转子感应电动机调速

3.3.1 串电阻调速

绕线转子感应电动机改变转子回路的电阻值即可达到调速的目的，这种调速方法属于改变转差率调速。由电磁转矩的公式可得

$$\frac{R'_2}{s_N}=\frac{R'_2+R'_D}{s}$$

式中，R'_D 为外电路串接电阻。从图 3.4-4 可见，增大转子回路电阻，同步转速和最大转矩不变，但最大转差率改变，在负载转矩恒定时，它与电动机的转矩—转速特性的交点不同，如图中的 a、b、c 点，负载将在不同转速下运行。这种调速方法简单，但效率低。

3.3.2 串级调速

为了克服转子串电阻调速效率低的缺点，可不串电阻，而采用通过电力电子变换器获得一个附加电动势串入转子回路，同样可以达到调速目的，这就是串级调速方式。经频率折算后的转子电流方程为

$$\dot{I}_2=\frac{s\dot{E}_2+\dot{E}_D}{R_2+jsX_2}$$

式中，$\dot{E}_2$、X_2 分别为转子静止时、具有额定频率的电动势和漏电抗；E_D 为附加电动势。在转子电流保持恒定值时，改变附加电动势可以改变转差率达到调速目的。

调速过程中，随着转速变化，由变换器产生的附加电动势的频率，必须保持与转子绕组内感应电动势的频率一致。当附加电动势 $\dot{E}_D$ 与 $s\dot{E}_2$ 相位相反时，增大 $\dot{E}_D$，转差率 s 增大，转速降低，减小 $\dot{E}_D$，转差率 s 减小，$\dot{E}_D=0$，电动机的转速即为固有机械特性与负载特性所决定的转速，它低于同步转速，在此种情况下可实现同步转速以下的调速，即所谓次同步调速。当附加电动势 $\dot{E}_D$ 与 $s\dot{E}_2$ 相位相同时，则可实现同步转速以上的调速，即所谓超同步调速。附带指出，当变换器具有移相功能时，改变附加电动势 $\dot{E}_D$ 与 $s\dot{E}_2$ 的相位（非同相或反相）关系，此种串级调速方式不仅可改变电机的转速，同时还可以调节定子侧的功率因数。图 3.4-10 表示通过电力电子变换器实现串级调速的系统构成。在次同步转速下运行时，1VR 作可控整流桥，2VR 作逆变桥，转差功率从电动机的转子流出经 1VR 到 2VR 流向电网；在超同步运行时，1VR 作有源逆变桥，2VR 作可控整流桥，所需转差功率从电网经 2VR 到 1VR 流向转子。此种带电力电子变换器的串级调速方式适用于调速范围在 1∶2 的中、大型电动机。历史上串级调速曾经发展过一种机械式串级调速，此种调速机械结构比较复杂，现在已逐步为电气串级调速所取代。

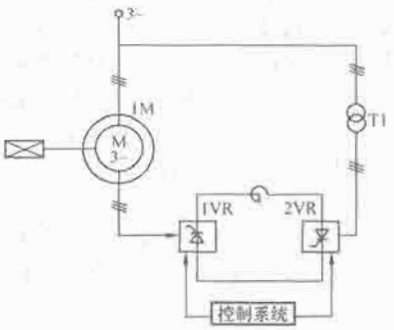


图 3.4-10 串级调速的系统构成

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 5 章　一般用途三相感应电动机

1　低压三相感应电动机

低压三相感应电动机的额定电压为 690V 及以下，常用的额定电压为 380V。低压三相感应电动机按产品的用途进行分类，一般分为一般用途以及规定用途和特殊用途产品。一般用途的电动机系列产品又称为基本系列，该系列产品生产量大，使用面广，由于其结构简单、实用可靠，而得到广泛的应用，能够适应一般的传动要求。

低压三相感应电动机有 Y、Y2 和 Y3 三个基本系列产品，该三个系列产品的主要技术参数及特点见表 3.5-1。

表 3.5-1　　Y、Y2、Y3 三个系列的主要技术参数及特点

系列产品	Y 系列	Y2 系列	Y3 系列
功率（kW）	0.55～200	0.12～315	0.12～315
机座中心高	80～315mm 共 12 个机座	63～355mm 共 15 个机座	63～355mm 共 15 个机座
基本极数	2，4，6，8，10	2，4，6，8，10	2，4，6，8，10
产品规格数	共 84 个规格	共 117 个规格	共 117 个规格
额定电压	380V	380V	380V
额定频率	50Hz	50Hz	50Hz
绝缘等级	B 级	F 级	F 级
防护型式	IP44	IP54	IP55
结构外形	机座散热筋为沿径向辐射状分布，铸铁机座，接线盒在侧面	机座散热筋为垂直、平行分布；铸铁机座，H63～112 还有铝合金机座；接线盒在侧面或顶部；H180～280 轴承润滑有不停机加油结构	机座散热筋为垂直、平行分布；铸铁机座，H63～112 还有铝合金机座；接线盒在侧面或顶部；H180～280 轴承润滑有不停机加油结构
噪声水平	考核空载噪声	同时考核空载、负载噪声	同时考核空载、负载噪声
硅钢片材料	热轧硅钢片	热轧硅钢片	冷轧硅钢片
标准编号	JB/T 10391—2002	JB/T 8680.1—1998	JB/T 10447—2004

1.1　Y 系列电动机

Y 系列电动机是首次全面采用国际电工委员会（IEC）标准的电机产品，电动机的额定频率为 50Hz，额定电压为 380V，电动机的定额是以连续工作制（S1）为基准的连续定额，电动机采用 B 级绝缘，并在国内第一次提出了考核电机空载噪声的要求。Y 系列电动机的标准化程度较高，具有“积木式”的组合功能，根据各种不同场合和环境的需要，在 Y 系列电动机上派生了 18 类派生和特殊专用系列产品。

1.1.1　结构型式

一般用途的电动机产品包括笼型和绕线转子两种，又根据防护等级、冷却方式的不同，有 IP44（又称为封闭式）和 IP23（又称为防护式）两类基本结构型式。封闭式结构的电动机通常在非轴伸端安装有冷却风扇，而防护式结构的电动机则不安装冷却风扇。

1.1.2　功率、机座号与同步转速的对应关系

（1）Y 系列（IP44）电动机

Y 系列（IP44）电动机为笼型转子结构，其功率、机座号与同步转速的对应关系见表 3.5-2。

表 3.5-2　　Y 系列（IP44）电动机功率、机座号与同步转速的对应关系

机座号	同步转速（r/min）				
	3000	1500	1000	750	600
	功率（kW）				
80M1	0.75	0.55	—	—	—
80M2	1.1	0.75			
90S	1.5	1.1	0.75		
90L	2.2	1.5	1.1		
100L1	3	2.2	1.5		
100L2		3			
112M	4	4	2.2		
132S1	5.5	5.5	3	2.2	
132S2	7.5				
132M1	—	7.5	4	3	
132M2			5.5		

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

机座号	同步转速（r/min）				
	3000	1500	1000	750	600
	功率（kW）				
160M1	11	11	7.5	4	—
160M2	15			5.5	
160L	18.5	15	11	7.5	
180M	22	18.5	—	—	
180L	—	22	15	11	
200L1	30	30	18.5	15	
200L2	37		22		
225S	—	37	—	18.5	
225M	45	45	30	22	
250M	55	55	37	30	
280S	75	75	45	37	
280M	90	90	55	45	
315S	110	110	75	55	45
315M	132	132	90	75	55
315L1	160	160	110	90	—
315L2	200	200	132	110	75

注 S、M、L后面的数字1、2分别代表同一机座号和转速下不同的功率。

（2）Y系列（IP23）电动机

Y系列（IP23）电动机为笼型转子结构，其防护等级相对于IP44而言，防护等级较低，故适用于户内周围环境比较清洁的场合。其功率、机座号与同步转速的对应关系见表3.5-3。由于IP23结构电动机的通风冷却条件较IP44为佳，故同机座号电动机的功率可适当提高，且单位功率的硅钢片、电磁线等有效材料用量较省。

表3.5-3 Y系列（IP23）电动机功率、机座号与同步转速的对应关系

机座号	同步转速（r/min）					
	3000	1500	1000	750	600	500
	功率（kW）					
160M	15	11	7.5	5.5	—	—
160L1	18.5	15	11	7.5		
160L2	22	18.5				
180M	30	22	15	11		
180L	37	30	18.5	15		
200M	45	37	22	18.5		
200L	55	45	30	22		
225M	75	55	37	30		
250S	90	75	45	37		
250M	110	90	55	45		
280S	—	110	75	55		
280M	132	132	90	75		
315S	160	160	110	90	55	
315M1	185	185	132	110	75	
315M2	200	200	160	132①	90①	
315M3	220	220	—	—	—	
315M4	250①	250①	—	—	—	
355M1	—	—	185	—	—	
355M2	280	280	200	160	110	
355M3	315	315	220	185	132	
355M4	—	—	250	200	—	90
355L1	355	355	280	220	160	110
355L2	—	—	—	250②	185②	132②

续表

注 S、M、L后面的数字1、2代表同一机座号和转速下不同的功率。

① 功率安排允许放入355M机座。

② 功率安排推荐放入355L机座，但也允许放入400机座，此时安装尺寸应由制造厂与用户协商后确定。

（3）YR系列（IP44）电动机

YR系列（IP44）电动机为绕线转子结构，该系列电动机能在较小的起动电流下，提供较大的起动转矩，并能在一定的范围内调节电机的转速。它广泛用于下列场合：

1）需要比笼型电动机更大的起动转矩。

2）馈电线路容量不足以起动笼型电动机。

3）起动惯量较大和起动比较频繁。

4）需要小范围调速运行。

5）连成“电轴”用作同步传动等。

通常，YR系列（IP44）电动机用作压缩机、榨糖机、纺织机、拉丝机、传输机、印刷机等机械的动力设备。其功率、机座号与同步转速的对应关系见表3.5-4。

表3.5-4 YR系列（IP44）电动机功率、机座号与同步转速的对应关系

机座号	同步转速（r/min）		
	1500	1000	750
	功率（kW）		
132M1	4	3	—
132M2	5.5	4	
160M	7.5	5.5	4
160L	11	7.5	5.5
180L	15	11	7.5
200L1	18.5	15	11
200L2	22		
225M1	30	18.5	15
225M2		22	18.5
250M1	37	30	22
250M2	45	37	30
280S	55	45	37
280M	75	55	45
315S	90	75	55
315M	110	90	75
315L	132	110	90

（4）YR系列（IP23）电动机

YR系列（IP23）电动机为绕线转子结构，其功率、机座号与同步转速的对应关系见表3.5-5。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3.5-5　YR 系列（IP23）电动机功率、机座号与同步转速的对应关系

机座号	同步转速（r/min）				
	1500	1000	750	600	500
	功率（kW）				
160M1	7.5	5.5	4		
160L1	11	7.5	5.5		
160L2	15				
180M	18.5	11	7.5		
180L	22	15	11		
200M	30	18.5	15		
200L	37	22	18.5	—	
225M1	45	30	22		
225M2	55	37	30		
250S	75	45	37		
250M	90	55	45		—
280S	110	75	55		
280M	132	90	75		
315S	160	110	90	55	
315M1	185	132	110	75	
315M2	200	160	132①	90①	
315M3	220	—	—	—	
315M4	250①				
355M1		185			
355M2	280	200	160	110	
355M3	315	220	185	132	
355M4	—	250	200	—	90
355L1	355	280	220	160	110
355L2	—	—	250②	185②	132②

注　S、M、L 后面的数字 1、2 代表同一机座号和转速下不同的功率。

① 功率安排允许放入 355M 机座。

② 功率安排推荐放入 355L 机座，但也允许放入 400 机座，此时安装尺寸应由制造厂与用户协商后确定。

1.1.3　主要性能指标

低压三相感应电动机的主要性能指标有效率 η、功率因数 $\cos\varphi$、堵转电流 I_k、堵转转矩 T_k、最大转矩 T_{max}、噪声和振动等。各基本系列产品的性能指标可参阅以下相关产品的技术条件：

1）JB/T 10391—2002　Y 系列（IP44）三相异步电动机技术条件（机座号 80～315）。

2）JB/T 5271—1991　Y 系列（IP23）三相异步电动机技术条件（机座号 160～280）。

3）JB/T 5272—1991　Y 系列（IP23）三相异步电动机技术条件（机座号 315～355）。

4）JB/T 7119—1993　YR 系列（IP44）三相异步电动机技术条件（机座号 132～315）。

5）JB/T 5269—1991　YR 系列（IP23）三相异步电动机技术条件（机座号 160～280）。

6）JB/T 5270—1991　YR 系列（IP23）三相异步电动机技术条件（机座号 315～355）。

1.2　Y2 系列电动机

Y2 系列（IP54）电动机是在 Y 系列电动机基础上更新设计的一般用途的基本系列电动机。机座号范围为 H63～355，共有 15 个机座，功率范围为 0.12～315kW，形成了一个完整的低压三相异步电动机系列产品；Y2 系列防护等级为 IP54，采用 F 级绝缘结构，提高了电机的可靠性；针对我国电机产品在噪声、振动以及重量、体积等方面与国外先进产品存在的差距，Y2 系列改进了电磁和机械设计，提高了制造精度，通过选择合适的定转子槽配合和转子槽斜度，增强机座和端盖的刚度，改进风罩和风扇结构等，有效控制了电机的噪声，并在国内首次提出考核电机负载噪声的要求。

Y2 系列（IP54）电动机外形与 Y 系列电动机比较，有较大的改观。其机座外形的散热筋结构呈垂直、平行分布方式，增加了机座表面散热面积；并采用浅端盖结构，增加端盖内加强筋的数量和尺寸，提高了端盖刚度。机座号 63～280 的接线盒采用铝合金压铸，接线盒座与机座及接线盒盖之间均采用橡胶密封圈。其典型外形结构如图 3.5-1 所示。



图 3.5-1　Y2 系列（IP54）电动机的外形结构

1.2.1　功率、机座号与同步转速的对应关系

Y2 系列（IP54）电动机功率、机座号与同步转速的对应关系见表 3.5-6。

1.2.2　Y2 系列（IP54）电动机的主要性能指标

Y2 系列（IP54）电动机分为两种设计：第一种设计即 Y2 系列（IP54）电动机，机座号范围为 H63～355，该系列可以满足一般用途的需要；第二种设计即 Y2-E 系列（IP54）电动机，具有较高的效率指标和良好的节能效果，机座号范围为 H80～280，故较适用于长期连续运行、负载率较高的使用场合，如部分风机、水泵类负载。

两种设计的电动机的效率、功率因数、堵转电流、堵转转矩、空载噪声和负载噪声等主要性能指标的规定可参阅以下产品技术条件：

JB/T 8680.1—1998　三相异步电动机技术条件　第一部分　Y2 系列（IP54）三相异步电动机（机座号 H63～355）；

JB/T 8680.2—1998　三相异步电动机技术条件　第二部分　Y2-E 系列（IP54）三相异步电动机（机座号 H80～280）。

Y2 系列（IP54）电动机负载噪声的考核方法，是在空载噪声数值的基础上增加一个负载噪声数值的增量（见表 3.5-7），即电动机在负载时测得的 A 计权声功率级的噪声数值应不大于空载噪声数值与负载噪声数值增量之和。

1.3　Y3 系列电动机

Y3 系列（IP55）电动机是以冷轧硅钢片为导磁材料，并且满足 GB 18613—2002《中小型三相异步电动机能效限定值及节能评价值》中能效限定值的一般用途基本系列电动机。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

Y3系列电动机的机座号范围为H63～355，功率范围为0.12～315kW；Y3系列防护等级为IP55，采用F级绝缘结构，全系列温升按B级考核，提高了电机的可靠性。

Y3系列（IP55）电动机的机座外形结构与Y2系列（IP54）电动机相同。

Y3系列（IP55）电动机功率、机座号与同步转速的对应关系与Y2系列（IP54）电动机一致，见表3.5-6。

Y3系列（IP55）电动机的效率、功率因数、堵转电流、堵转转矩和噪声等主要性能指标可参阅JB/T 10447—2004《Y3系列（IP55）三相异步电动机技术条件》，其中效率指标与GB 18613—2002的能效限定值相一致，见表3.5-7。

表3.5-6 Y2系列（IP54）电动机功率、机座号与同步转速的对应关系

机座号	同步转速（r/min）				
	3000	1500	1000	750	600
	功率（kW）				
63M1	0.18	0.12	—	—	—
63M2	0.25	0.18			
71M1	0.37	0.25	0.18		
71M2	0.55	0.37	0.25		
80M1	0.75	0.55	0.37	0.18	
80M2	1.1	0.75	0.55	0.25	
90S	1.5	1.1	0.75	0.37	
90L	2.2	1.5	1.1	0.55	
100L1	3	2.2	1.5	0.75	
100L2		3		1.1	
112M	4	4	2.2	1.5	
132S1	5.5	5.5	3	2.2	—
132S2	7.5				
132M1	—	7.5	4	3	
132M2			5.5		
160M1	11	11	7.5	4	
160M2	15			5.5	
160L	18.5	15	11	7.5	
180M	22	18.5	—	—	
180L	—	22	15	11	
200L1	30	30	18.5	15	
200L2	37		22		
225S	—	37	—	18.5	
225M	45	45	30	22	

续表

机座号	同步转速（r/min）				
	3000	1500	1000	750	600
	功率（kW）				
250M	55	55	37	30	—
280S	75	75	45	37	
280M	90	90	55	45	
315S	110	110	75	55	45
315M	132	132	90	75	55
315L1	160	160	110	90	75
315L2	200	200	132	110	90
335M1	250	250	160	132	110
355M2			200	160	132
355L	315	315	250	200	160

表3.5-7 Y2系列（IP54）负载噪声数值的增量

功率（kW）	同步转速（r/min）				
	3000	1500	1000	750	600
	声功率级（dB）（A）				
≤11	2	5	7	8	—
>11～37	2	4	6	7	
>37～110	2	3	5	6	7
>110～315	2	3	4	5	6

2 高压三相感应电动机

高压三相感应电动机通常指额定电压为3kV、6kV和10kV的笼型和绕线转子三相感应电动机。该类电动机的系列、品种、规格繁多，有不同外壳防护等级的系列产品和特殊用途的专用产品，其中以6kV，机座号355～630mm，4～12极中型电动机产量最大。它广泛用于石油、化工、电站、矿山、冶金等工业部门，驱动泵、风机、空气压缩机、球磨机、粉碎机等机械设备。

作为一般用途的基本系列产品，本节将论及防护式（IP23）感应电动机、带冷却器封闭式（IP44，IP54）感应电动机和全封闭外扇冷感应电动机。

2.1 防护式高压三相感应电动机

2.1.1 主要设计参数

防护式高压三相感应电动机的外壳防护等级为IP23，Y系列为笼型感应电动机，YR系列为绕线转子感应电动机。其中机座号为355～630mm，6kV中型高压感应电动机的主要设计参数见表3.5-8。

表3.5-8 Y、YR系列中型高压感应电动机主要参数

机座号	额定频率（Hz）	极数	同步转速（r/min）	功率范围（kW）	绝缘等级	温升限值（K）	定子铁心外径（mm）		气隙磁通密度（T）	定子电流密度（A/mm²）	热负荷[A²/(cm·mm²)]
355	50	2～6	3000～1000	220～315	F	80	560	590	0.70～0.85	4.5～6.0	2000～3400
400		2～8	3000～750	220～560			630	670			
450		2～12	3000～500	220～900			710	740			
500				280～1400			800	850			
560				500～2000			900	950			
630				710～2800			990	1060			

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.1.2　结构特点

1）采用新型箱式结构。一般采用长方形钢板焊接箱式结构，整台电动机分成若干独立的部件，主要为定子、转子、底座、轴承和外罩。这些部件可以同时分别制造，在总装时组合成一体。只要更换按不同要求设计的顶罩，就可以由基本的防护型式派生出空-空冷却封闭式、空-水冷却封闭式、气候防护式、管道通风式等各种防护型式，克服了老产品品种单一的缺点。

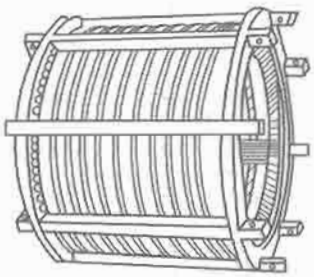


图 3.5-2　定子铁心

2）定子铁心为外压装焊筋结构。定子铁心冲片叠压后，在压紧状态下，用角钢或方钢作为筋与定子压圈和铁心外圆焊接固紧，构成一个整体，如图 3.5-2 所示，以便于线圈下线及浸渍处理。

3）外压装定子装入机座的方式有从上面吊入和沿轴向推入两种。机座与定子的配合方式多样，有定子压圈与机座壁板内孔直接配合，或定子铁心外圆与机座筋板配合，或定子铁心外圆拉筋与机座壁板内孔配合等多种型式，具体视不同的加工工艺而定。

4）可选用径向，轴向或径、轴向混合通风等不同通风系统。基本系列采用带顶罩的箱式结构时，采用径向通风系统；采用不带顶罩的箱式结构时，采用轴向或混合通风系统。

5）在保证运行可靠的前提下，定子开口槽尽量采用磁性槽楔。

6）焊接铜笼感应电动机转子导条采用中频整体焊接，导条在槽内采取楔紧措施。

7）根据需要，在电动机轴上焊辐铁，以改善转子通风条件，增大轴向进风道面积，以利于电动机散热。

8）机座号 1000mm 及以下的大中型电动机采用端盖式滚动或滑动轴承结构。

2.1.3　机座号、功率与同步转速的对应关系

外壳防护等级为 IP23 或 IP44 管道通风式的 Y、YR 系列一般用途高压三相感应电动机的机座号、功率与同步转速的对应关系见表 3.5-9～表 3.5-11。

主要性能指标可参阅：

JB/T 7593—1994《Y 系列高压三相异步电动机技术条件》（机座号 355-630）

JB/T 7594—1994《YR 系列高压三相异步电动机技术条件》（机座号 355-630）

Y、YR 系列 10kV 高压三相感应电动机的机座号、功率与同步转速的对应关系及主要性能指标可参阅：

JB/T 10445—2004《YR 系列 10kV 绕线转子三相异步电动机技术条件》（机座号 450-630）

JB/T 10446—2004《Y 系列 10kV 三相异步电动机技术条件》（机座号 450-630）

表 3.5-9　Y、YR 系列（6kV、IP23、H355～630）电动机功率、机座号与同步转速的对应关系　　单位：kW

机座号	Y 系列						YR 系列				
	同步转速（r/min）										
	3000	1500	1000	750	600	500	1500	1000	750	600	500
355	220	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	250	200									
	280	220					220				
	315	250	200				250				
	355	280	220				280				
	400	315	250								
400	450	355					315	220			
	500	400	280				355	250			
	560	450	315	220			400	280	220		
	630	500	355	250			450	315	250		
		560	400	280			500	355	280		
450	710	630	450	315	220		560	400	315	220	
	800	710	500	355	250		630	450	355	250	
	900	800	560	400	280		710	500	400	280	
	1000	900	630	450	315	220	800	560	450	315	220
	—	—	—	—	355	250	—	—	—	355	250
500	1120	1000	710	500	400	280	900	630	500	400	280
	1250	1120	800	560	450	315	1000	710	560	450	315
	1400	1250	900	630	500	355	1120	800	630	500	355
	1600	1400	1000	710	560	400	1250	900	710	560	400
	—	—	—	—	630	450	—	—	—	—	450
560	1800	1600	1120	800	710	500	1400	1000	800	630	500
	2000	1800	1250	900	800	560	1600	1120	900	710	560
	2240	2000	1400	1000	900	630	1800	1250	1000	800	630
630	2500	2240	1600	1120	1000	710	2000	1400	1120	900	710
	2800	2500	1800	1250	1120	800	2240	1600	1250	1000	800
	3150	2800	2000	1400	1250	900	2500	1800	1400	1120	900
	—	—	—	1600	1400	1000	—	—	1600	1250	1000

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3.5-10 Y、YR 系列（6kV、IP23、H710～1000）电动机功率、机座号与同步转速的对应关系 单位：kW

机座号	Y 系列						YR 系列					
	同步转速（r/min）											
	1500	1000	750	600	500	375	1500	1000	750	600	500	375
710	3150	2240	1800	1600	1120	630	2800	2000	1800	1400	1120	630
	3550	2500	2000	1800	1250	710	3150	2240	2000	1600	1250	710
	4000	2800	2240	2000	1400	800	3550	2500	2240	1800	1400	800
	4500	3150	—	—	—	900	4000	2800	—	—	—	900
800	5000	3550	2500	2240	1600	1000	4500	3150	2500	2000	1600	1000
	5600	4000	2800	2500	1800	1120	5000	3550	2800	2240	1800	1120
	6300	4500	3150	2800	2000	1250	5600	4000	3150	2500	2000	1250
	—	5000	3550	—	2240	1400	—	4500	—	—	2240	1400
900	7100	5600	4000	3150	2500	1600			3550	2800	2500	1600
	8000	6300	4500	3550	2800	1800			4000	3150	2800	1800
	9000	7100	5000	4000	3150	2000			4500	3550	3150	2000
	—	—	—	4500	—	—			—	4000	—	—
1000	—	8000	5600	5000	3550	2240	—	—	—	4500	3550	2240
		9000	6300	5600	4000	2500				5000	4000	2500
		10000	7100	6300	4500	2800				5600	4500	2800
		—	8000	7100	5000	—				—	5000	—

表 3.5-11 Y、YR 系列（10kV、IP23、H710～1000）电动机功率、机座号与同步转速的对应关系 单位：kW

机座号	Y 系列					YR 系列				
	同步转速（r/min）									
	1500	1000	750	600	500	1500	1000	750	600	500
710	2500	2000				2500	2000			
	2800	2240	—	—	—	2800	2240	—		
	3150	2500				3150	2500			
	3550	—				3550	—			
800	4000	2800	2500			4000	2800	2500		
	4500	3150	2800	—	—	4500	3150	2800	—	—
	5000	3550	—			5000	3550	—		
	5600	—	—			5600	—	—		
900	6300	4000	3150	2500			4000	3150	2500	
	7100	4500	3550	2800	—		4500	3500	2800	
	8000	5000	—	—			5000	—	—	
	—	5600	—	—		—	—	—	—	
1000	9000	6300	4000	3150	2500			4000	3150	2500
	10000	7100	4500	3550	2800		—	4500	3550	2800
	—	8000	5000	—	3150			5000	—	3150
		—	—	—	3550			—	—	3550

2.2 带冷却器封闭式高压三相感应电动机

2.2.1 系列产品及其防护等级

带冷却器封闭式高压三相感应电动机的外壳防护等级为 IP44 或 IP54，冷却器有空-空冷却器及空-水冷却器两种。系列产品及其对应的外壳防护等级见表 3.5-12。

2.2.2 带空-空冷却器的封闭式高压三相感应电动机

在电机的顶部（或侧面）装上冷却器，冷却器内有许多

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3.5-12 带冷却器封闭式高压电动机系列产品

序号	系列名称	额定电压	外壳防护等级	产品技术条件
1	YKK 系列封闭式带空-空冷却器的三相高压异步电动机（机座号 355～630）	6kV 或 3kV	IP44	JB/T 10315.2—2002
2	YKK-W 系列封闭式带空-空冷却器的户外用三相高压异步电动机（机座号 355～630）		IP54	JB/T 10315.2—2002
3	YRKK 系列封闭式带空-空冷却器的三相高压绕线转子异步电动机（机座号 355～630）		IP44	JB/T 10314.2—2002
4	YRKK-W 系列封闭式带空-空冷却器的户外用三相高压绕线转子异步电动机（机座号 355～630）		IP54	JB/T 10314.2—2002
5	YKS 系列封闭式带空-水冷却器的三相高压异步电动机（机座号 355～630）		IP44	JB/T 10315.1—2002
6	YKS-W 系列封闭式带空-水冷却器的户外用三相高压异步电动机（机座号 355～630）		IP54	JB/T 10315.1—2002
7	YRKS 系列封闭式带空-水冷却器的三相高压绕线转子异步电动机（机座号 355～630）		IP44	JB/T 10314.1—2002
8	YRKS-W 系列封闭式带空-水冷却器的户外用三相高压绕线转子异步电动机（机座号 355～630）		IP54	JB/T 10314.1—2002

冷却管。由安装在非轴伸端的外风扇将空气吹入冷却管，由轴伸端向外排出。电机内部空气，由内风扇进行循环，通过冷却器管壁进行热交换，使热空气冷却，被冷却了的内部空气再次冷却电机各部分。机壳内外空气不能自由交换，以防止电机外部空气污染内部风路。

该类电机主要使用在要求减少维护或需要保护绕组不受大气影响的地方，可安装在户内、户外或空气中含有灰尘、砂、水分或轻微腐蚀性气体的环境中。

采用箱式结构的大中型高压电机，空-空冷却器呈矩形，放置于电机敞开的顶部，如图 3.5-3（a）所示，与基本系列电机的零部件通用性好，只需在基本型式上更换外罩即可获得。根据用户需要，空-空冷却器也有呈环形，放置于电机外壳周围的，如图 3.5-3（b）所示，此时与基本系列电机的零部件通用性低，机壳设计较特殊，但其密封型和冷却效果较佳，特别适用于有防爆性能要求的场合。

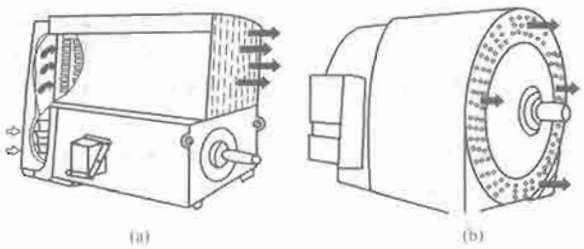


图 3.5-3 带空-空冷却器的封闭式电机外形图
（a）空-空冷却器呈矩形；（b）空-空冷却器呈环形

带空-空冷却器的封闭式电机的输出功率受冷却器特性和空气流量的影响，通常比防护式电机的低。带空-空冷却器 IP44 和 IP54 电动机同机座号的输出功率较 IP23 Y、YR 系列电动机低 2～3 级，其机座号、功率与同步转速的对应关系见表 3.5-13。

表 3.5-13 带空-空冷却器的电动机系列（6kV、IP44、IP54）功率、机座号与同步转速的对应关系 单位：kW

机座号		YKK、YKK-W 系列						YRKK、YRKK-W 系列				
		同步转速（r/min）										
		3000	1500	1000	750	600	500	1500	1000	750	600	500
355	1	220	185	—	—	—	—	185	—	—	—	—
	2	250	200					200				
	3	280	220					220				
	4	315	250					—				
400	1	—	—	185	—	—	—	250	185	—	—	—
	2	355	280	200				280	200			
	3	400	315	220				315	220			
	4	450	355	250	185			355	250	185		
	5	500	400	280	200			400	280	200		
	6	—	450	315	220			—	—	—		
450	1	—	—	—	—	185	—	450	315	220	185	—
	2	560	500	355	250	200		500	355	250	200	
	3	630	560	400	280	220		560	400	280	220	185
	4	710	630	450	315	250	185	630	450	315	250	200
	5	800	710	500	355	280	200	—	—	—	—	—

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

机座号		YKK、YKK-W系列						YRKK、YRKK-W系列				
		同步转速（r/min）										
		3000	1500	1000	750	600	500	1500	1000	750	600	500
500	1	900	800	560	400	315	220	710	500	355	280	220
	2	1000	900	630	450	355	250	800	560	400	315	250
	3	1120	1000	710	500	400	280	900	630	450	355	280
	4	1250	1120	800	560	450	315	1000	710	500	400	315
560	1	1400	1250	900	630	500	355	—	—	560	450	—
	2	1600	1400	1000	710	560	400	1120	800	630	500	355
	3	1800	1600	1120	800	630	450	1250	900	710	560	400
	4	—	—	—	—	710	500	1400	1000	800	630	450
630	1	2000	1800	1250	900	800	560	1600	1120	900	710	500
	2	2240	2000	1400	1000	900	630	1800	1250	1000	800	560
	3	2500	2240	1600	1120	1000	710	2000	1400	1120	900	630
	4	—	—	—	1250	1120	800	—	—	1250	1000	710

2.2.3 带空-水冷却器的封闭式高压三相感应电动机

冷却原理与带空-空冷却器的相同，只是冷却管内不是外界空气的流动而代之以水的流动。当不可能向电动机提供清洁的冷却空气或不想将热风排入工作环境时，可使用水冷却器。这种电动机特别适用于周围环境温度高或有爆炸性气体的场合。

空-水冷却器可以装在电动机的顶部和两侧，通常冷却器放在顶部，此时只需在基本型式上更换顶罩即可，与基本系列电机的零部件通用性好。

由于水冷却的效果要比空气冷却的好，故带空-水冷却器的IP44和IP54封闭式电动机可与IP23防护式电动机达到同样的输出功率。另外，水冷却电动机不用外风扇，故风摩损耗小，再加之外罩的隔音作用，使噪声也大幅度降低。水冷却的缺点是需要另外装备一套供水和回水装置。

2.3 全封闭外扇冷感应电动机

2.3.1 产品概况

Y2系列中型高压三相感应电动机是一种带散热片结构的全封闭外扇冷感应电动机，外壳防护等级为IP54，产品结构紧凑，高效节能。该产品以其新颖的造型、优良的使用性能、可靠的运行能力和方便的维护性赢得了用户的青睐，在造纸、电力、水处理、石化、钢铁、采矿等众多工业领域中获得广泛的应用。电动机供电电压为3kV或6kV，机座号有355mm、400mm、450mm、500mm、560mm，极数有2、4、6、8极。

2.3.2 结构特点

1）Y2系列高压电动机的结构特点保留了模块化设计的理念，所有零部件都具有较高的通用性和互换性，在不改变主要模具的情况下，可以很方便地满足IP23、IP44、IP54甚至更高防护等级的要求。

2）设计了内循环和外循环两个相互独立的风路系统，由内风扇、转子通风槽以及机壳上的四条通风道所构成的内循环冷却风路，把转子和轴承产生的热量传递到机壳上加以冷却，较好地解决了轴向通风时电动机内部温度场分布不均匀的问题。

3）采用高强度铸铁制造机壳、端盖、轴承内外盖以及接线盒，机壳上的散热片采用了国际上广为流行的垂直、平行排列方式，散热片之间采用了不等距分布和非同心圆的组合方式，使得机壳有很好的强度和散热能力，具有优美的外观形状，并采用了“四半开箱”的造型结构，使机壳的铸造适宜在“树脂砂”造型线上快速、批量生产。

4）采用了“扁平”并带有散热片的端盖，加强了轴承的散热能力，增强了电机整个外壳的刚性，使电机的振动和噪声指标得到了改善。

5）电机选用“三轴承”结构，既加强了轴承的径向承载能力，又较好地解决了电机承受轴向力的问题，提高了电机运行的可靠性。

6）转子采用了可靠的铸铝结构，转子具有良好的一体性，转子导条和铁心之间有很好的热耦合性，可以满足较严酷的起动要求。

7）外风扇采用了多种不同型式的设计，其中两极电机采用的是单向轴流式风扇；在大机座号4、6极电机上，采用单向后倾式离心式风扇；在8极电机上，采用了双向直叶离心式风扇，所有内、外风扇均采用了奇数叶片。

8）采用了减薄绝缘的设计技术，其中6kV电机的定子绕组绝缘厚度为1.5mm（不含防晕层）。

2.3.3 机座号、功率与同步转速的对应关系

外壳防护等级为IP54的Y2系列中型高压三相感应电动机的机座号、功率与同步转速的对应关系见表3.5-14。

表3.5-14 Y2系列（6kV、IP54）电动机机座号、功率与同步转速的对应关系

机座号		同步转速（r/min）			
		3000	1500	1000	750
		功率（kW）			
355	1	185	185	—	—
	2	200	200		
	3	220	220	160	
	4	250	250	185	
	5	280	280	200	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

机座号		同步转速（r/min）			
		3000	1500	1000	750
		功率（kW）			
400	1	315	315	220	160
	2	355	355	250	185
	3	400	400	280	200
	4	450	450	315	220
450	1	500	500	355	250
	2	560	560	400	280
	3	630	630	450	315
	4	710	710	500	355
500	1	800	800	560	400
	2	900	900	630	450
	3	1000	1000	710	500
	4	1120	1120	800	560
560	1	1250	1250	900	630
	2	1400	1400	1000	710
	3	1600	1600	1120	800
	4	—	—	1250	900

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第6章 感应电动机节能及高效电机

1 电动机节能的意义和潜力

根据各主要工业国家和发展中国家的统计，在工业领域通过电动机传递的电能约占全部工业用电的2/3左右，因此提高电动机系统（包括电动机、连接器、负载机械以及控制器等）的效率对于工业领域的能源节约具有重要意义。由于在工业领域，感应电动机相对于其他电动机数量最多，占据着最大的工业用电份额，因此感应电动机的效率日益得到重视。应该指出，过去相当一段时间，对于一般用途感应电动机，对其性能要求主要为转矩、温升和噪声振动等，在保证这些性能的条件下求取最低的制造成本。由于绝缘材料的发展和电机结构设计的改进，电机的温升限值大幅提高，从而可使电机有效材料中的电磁负荷相应提高，其结果是电机的体积、重量以及成本下降，但往往带来损耗的增加和效率的下降。图3.6-1为一台4kW 4极感应电动机单位功率重量的变化，从图可见，20世纪90年代的电动机重量仅为30年代的1/6。

图3.6-2为美国电动机的效率变化，从图可见，在11.2kW以下，20世纪70年代的效率明显低于20世纪50年代的效率。同时由此可见，对于20世纪70年代以来设计的一般用途电动机而言，其效率水平在小型电机部分具有较大的提升潜力。

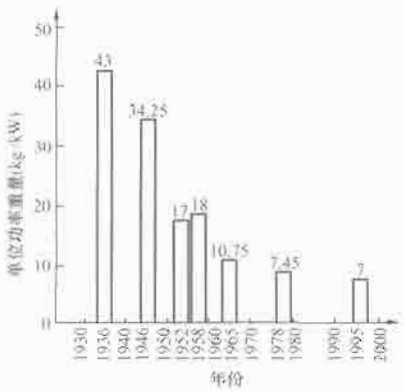


图3.6-1 1936～1995年4kW感应异步电动机单位功率重量的变化

2 高效电机及电动机能效标准

2.1 高效电机

高效电机一般指高效率三相感应电动机。这种电机开始出现在20世纪70年代第一次能源危机时，它们具有较高的效率，与一般电动机相比其损耗约下降20%左右，对于工作在运行时间较长，负载率较高的场合，具有较好的节能效果。这种电机的功率等级与安装尺寸关系，以及其他性能要求则与一般电动机相同。由于能源供应的持续紧张，近年又出现了所谓超高效率电机，其损耗又较高效率电机下降15%～20%。

2.2 电动机能效标准

（1）中国的电动机能效标准

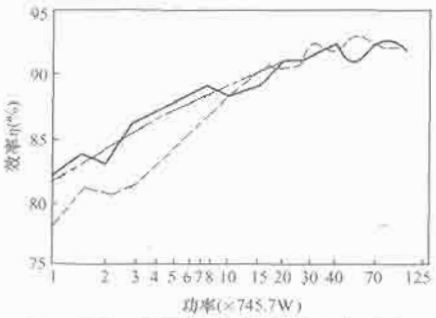


图3.6-2 美国电动机平均效率曲线
（1800r/min，B设计，防滴式）
——— 1955/1956年电动机
- - - - 1975年标准电动机
—·—·— 1976年高效率电动机

中国对中小型三相感应电动机制订了能效标准，即GB 18613—2006《中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》。该标准适用于690V及以下电压，频率为50Hz，功率在0.55～315kW范围内的封闭扇冷型三相笼型感应电动机。该标准将效率分为1、2、3三个能效等级，1级效率最高。标准于2006年批准后实施，能效等级3级为能效限定值，系强制性标准条款，要求一般用途电动机均应达到此指标；能效等级2级为节能评价值，系对节能电动机或高效电动机进行节能认证时所需满足之指标。标准还规定，在该标准实施4年后，能效等级2级将作为能效限定值。该标准规定的效率试验方法为损耗分析法，其中杂散损耗按输入功率的0.5%计算。该标准能效等级3级的效率水平相当于欧盟能效协定的eff 2等级，能效等级2级的效率水平则相当于欧盟能效协定的eff 1等级。表3.6-1为该电动机能效标准的效率指标。

（2）美国的电动机能效标准

美国的能源政策法令（即EPACT指令）规定，在美国生产和从国外进口到美国的电动机必须是高效率电机。该法令所覆盖的产品范围为电压230/460V，频率为60Hz，功率从1～149kW范围内的封闭型和开启型三相笼型感应电动机。该法令所规定的电动机效率试验方法为杂散损耗用输入输出法实测的损耗分析法。在表3.6-2中规定了其封闭型电机的效率指标数值。

为进一步促进更高效率电机的发展，美国电机制造商协会（NEMA）制订了超高效率电机的能效标准（NEMA MG1—1998 Table 12-12），损耗较EPACT指令规定的再下降20%左右，功率范围扩大到1～373kW。表3.6-3给出了该标准封闭型电机的效率指标。

（3）欧盟的电动机能效标准

欧盟的电动机能效标准为欧盟与欧洲电机制造商协会的协定（即EU-CEMEP协定）。该协定将电动机的效率分为eff 1、eff 2、eff 3三级，eff 1级的效率为最高。该协定所覆盖的产品范围为电压400V，频率为50Hz，功率从1.1～90kW范围内的封闭扇冷型三相笼型感应电动机。电动机效率的试验方法为损耗分析法，其中杂散损耗按输入功率的0.5%计算。表3.6-4和表3.6-5分别列出了该协定所规定的2极和4极电机三个等级的效率指标。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3.6-1　　中国电动机能效等级

额定功率 (kW)	效　率 (%)								
	1 级			2 级			3 级		
	2 极	4 极	6 极	2 极	4 极	6 极	2 极	4 极	6 极
0.55	—	—	—	—	80.7	75.4	—	71.0	65.0
0.75	—	—	—	77.5	82.3	77.7	75.0	73.0	69.0
1.1	—	—	—	82.8	83.8	79.9	76.2	76.2	72.0
1.5	—	—	—	84.1	85.0	81.5	78.5	78.5	76.0
2.2	—	—	—	85.6	86.4	83.4	81.0	81.0	79.0
3	—	—	86.9	86.7	87.4	84.9	82.6	82.6	81.0
4	89.3	89.9	87.9	87.6	88.3	86.1	84.2	84.2	82.0
5.5	90.1	90.7	89.1	88.6	89.2	87.4	85.7	85.7	84.0
7.5	90.9	91.5	90.6	89.5	90.1	89.0	87.0	87.0	86.0
11	91.9	92.2	91.4	90.5	91.0	90.0	88.4	88.4	87.5
15	92.5	92.9	92.3	91.3	91.8	91.0	89.4	89.4	89.0
18.5	92.9	93.3	92.7	91.8	92.2	91.5	90.0	90.0	90.0
22	93.3	93.6	93.1	92.2	92.6	92.0	90.5	90.5	90.0
30	93.9	94.2	93.6	92.9	93.2	92.5	91.4	91.4	91.5
37	94.2	94.5	94.0	93.3	93.6	93.0	92.0	92.0	92.0
45	94.6	94.8	94.4	93.7	93.9	93.5	92.5	92.5	92.5
55	94.9	95.0	94.7	94.0	94.2	93.8	93.0	93.0	92.8
75	95.4	95.5	95.0	94.6	94.7	94.2	93.6	93.6	93.5
90	95.5	95.7	95.2	95.0	95.0	94.5	93.9	93.9	93.8
110	95.8	96.1	95.7	95.0	95.4	95.0	94.0	94.5	94.0
132	96.1	96.1	96.7	96.4	95.4	95.0	94.5	94.8	94.2
160	96.1	96.1	95.7	95.4	95.4	95.0	94.6	94.9	94.5
200	96.1	96.1	95.7	95.4	95.4	95.0	94.8	94.9	94.5
250	96.1	96.1	95.7	95.8	95.8	95.0	95.2	95.2	91.5
315	96.1	96.1	—	95.8	95.8	—	95.4	95.2	—

注　容差应符合 GB 755 第 11 章的规定。

表 3.6-2　　美国 EPACT 效率值（封闭型电机）　　单位：%

功率 (hp)	2 极		4 极		6 极	
	额定值	最小值	额定值	最小值	额定值	最小值
1.0	75.5	74.0	82.5	81.5	80.0	78.5
1.5	82.5	81.5	84.0	82.5	85.5	84.0
2.0	84.0	82.5	84.0	82.5	86.5	85.5
3.0	85.5	84.0	87.5	86.5	87.5	86.5
5.0	87.5	86.5	87.5	86.5	87.5	86.5
7.5	88.5	87.5	89.5	88.5	89.5	88.5
10.0	89.5	88.5	89.5	88.5	89.5	88.5
15.0	90.2	89.5	91.0	90.2	90.2	89.5
20.0	90.2	89.5	91.0	90.2	90.2	89.5
25.0	91.0	90.2	92.4	91.7	91.7	91.0
30.0	91.0	90.2	92.4	91.7	91.7	91.0
40.0	91.7	91.0	93.0	92.4	93.0	92.4
50.0	92.4	91.7	93.0	92.4	93.0	92.4
60.0	93.0	92.4	93.6	93.0	93.6	93.0
75.0	93.0	92.4	94.1	93.6	93.6	93.0

续表

功率 (hp)	2 极		4 极		6 极	
	额定值	最小值	额定值	最小值	额定值	最小值
100.0	93.6	93.0	94.5	94.1	94.1	93.6
125.0	94.5	94.1	94.5	94.1	94.1	94.5
150.0	94.5	94.1	95.0	94.5	95.0	94.5
200.0	95.0	94.5	95.0	94.5	95.0	94.5

注　1hp=745.700W。

表 3.6-3　　美国 NEMA 超高效率电机标准

（MG 1—1998 Table 12-12）

功率 (hp)	封闭型电动机效率 (%)					
	2 极		4 极		6 极	
	额定值	最小值	额定值	最小值	额定值	最小值
1	77.0	74.0	85.5	82.5	82.5	80.0
1.5	84.0	81.5	86.5	84.0	87.5	85.5
2	85.5	82.5	86.5	84.0	88.5	86.5

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

功率 (hp)	封闭型电动机效率(%)					
	2极		4极		6极	
	额定值	最小值	额定值	最小值	额定值	最小值
3	86.5	84.0	89.5	87.5	89.5	87.5
5	88.5	86.5	89.5	87.5	89.5	87.5
7.5	89.5	87.5	91.7	90.2	91.0	89.5
10	90.2	88.5	91.7	90.2	91.0	89.5
15	91.0	89.5	92.4	91.0	91.7	90.2
20	91.0	89.5	93.0	91.7	91.7	90.2
25	91.7	90.2	93.6	92.4	93.0	91.7
30	91.7	90.2	93.6	92.4	93.0	91.7
40	92.4	91.0	94.1	93.0	94.1	93.0
50	93.0	91.7	94.5	93.6	94.1	93.0
60	93.6	92.4	95.0	94.1	94.5	93.6
75	93.6	92.4	95.4	94.5	94.5	93.6
100	94.1	93.0	95.4	94.5	95.0	94.1
125	95.0	94.1	95.4	94.5	95.0	94.1
150	95.0	94.1	95.8	95.0	95.8	95.0
200	95.4	94.5	96.2	95.4	95.8	95.0
250	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0
300	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0
350	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0
400	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0
450	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0
500	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0

注 1hp=745.700W。

表 3.6-4 欧盟 CEMEP 2极电机效率分级表

功率 (kW)	eff3 η(%)	eff2 η(%)	eff1 η(%)
1.1	<76.2	≥76.2	≥82.8
1.5	<78.5	≥78.5	≥84.1
2.2	<81.0	≥81.0	≥85.6
3	<82.6	≥82.6	≥86.7
4	<84.2	≥84.2	≥87.6
5.5	<85.7	≥85.7	≥88.6
7.5	<87.0	≥87.0	≥89.5
11	<88.4	≥88.4	≥90.5
15	<89.4	≥89.4	≥91.3
18.5	<90.0	≥90.0	≥91.8
22	<90.5	≥90.5	≥92.2
30	<91.4	≥91.4	≥92.9
37	<92.0	≥92.0	≥93.3
45	<92.5	≥92.5	≥93.7
55	<93.0	≥93.0	≥94.0
75	<93.6	≥93.6	≥94.6
90	<93.9	≥93.9	≥95.0

表 3.6-5 欧盟 CEMEP 4极电机效率分级表

功率 (kW)	eff3 η(%)	eff2 η(%)	eff1 η(%)
1.1	<76.2	≥76.2	≥83.8
1.5	<78.5	≥78.5	≥85.0
2.2	<81.0	≥81.0	≥86.4
3	<82.6	≥82.6	≥87.4
4	<84.2	≥84.2	≥88.3
5.5	<85.7	≥85.7	≥89.2
7.5	<87.0	≥87.0	≥90.1
11	<88.4	≥88.4	≥91.0
15	<89.4	≥89.4	≥91.8
18.5	<90.0	≥90.0	≥92.2
22	<90.5	≥90.5	≥92.6
30	<91.4	≥91.4	≥93.2
37	<92.0	≥92.0	≥93.6
45	<92.5	≥92.5	≥93.9
55	<93.0	≥93.0	≥94.2
75	<93.6	≥93.6	≥94.7
90	<93.9	≥93.9	≥95.0

3 提高电动机效率的措施

由于电机的损耗分布随功率大小和极数不同而变化，因此为降低损耗，应着重对不同功率和极数时的主要损耗分量采取措施，现将降低损耗的一些途径简述如下。

3.1 增加有效材料降低绕组损耗和铁损耗

根据电机相似原理可知，当电磁负荷不变，并且不考虑机械损耗时，损耗约与电机线性尺寸的3次方成比例，而电机的输入功率约与线性尺寸的4次方成比例，由此可近似得出效率 η 与有效材料用量的关系

$$\eta=1-\frac{1}{a}(1-\eta_0)$$

式中，a 为电机的尺寸比例系数，η_0 为原始电机的效率。

从该式可见，损耗与有效材料尺寸的线性增长成反比。图3.6-3为此关系所对应的曲线，图中虚线为对一台4kW感应电动机所作的验证。由图可见，在效率较低时，如在小功率电机中，增加材料，效率提高较大，而在效率已较高的大功率电机中，效率提高较小。

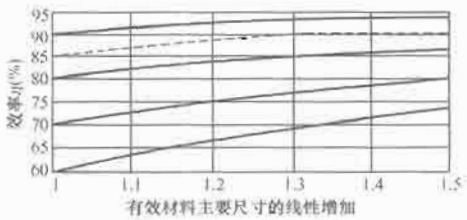


图 3.6-3 效率与有效材料线性增长的关系

为了使在一定的安装尺寸条件下，获得较大的空间，以使能置放较多的有效材料以提高电机效率，因此一般高效率电机或超高效率电机具有较大的定子冲片外径。

从图可见，由于渐近线的特点，当效率 $\eta\to100\%$ 时，$a\to\infty$，因此当效率达到较高数值，再单纯通过材料的增加来提高效率，并不一定经济合理，应通过技术经济指标的综合评价来确定。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3.2　采用较好的磁性材料和工艺措施以降低铁损耗

铁心材料的磁性能（磁导率和单位铁损耗）对电机的效率和其他性能影响较大，同时铁心材料费用又是构成电机成本的主要部分，因此选用合适的磁性材料是设计和制造高效率电机的关键。图 3.6-4 表示了 1.5kW、15kW、150kW 三台 4 极电机的空载电流与满载电流的比值。从中可见，在 1.5kW 电机中空载电流（主要是磁化电流）在满载电流中占了相当大的比重，达 70 %左右。因此在小功率电机中采用较高磁导率的电工钢片将可使定子铜耗显著下降，但在较大功率电机中由于空载电流所占比例已较小，材料磁导率提高的效果将不明显。

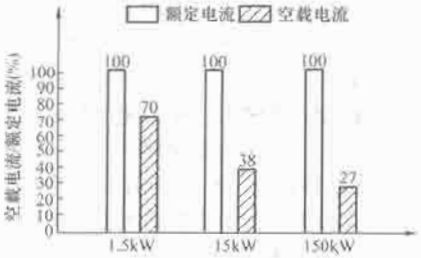


图 3.6-4　空载电流与额定电流的比值

在较大功率电机中，铁损耗在总损耗中已占到相当大的比重，因此降低铁心材料的单位损耗值将有助于电机铁损耗的下降。由于电机设计和制造的原因，电机铁损耗大大超过按钢厂提供的单位铁损耗值所计算的数值，所以一般在设计时将单位铁损耗值增加 1.5～2 倍来考虑铁损耗的增加。铁损耗增加的原因主要是由于钢厂的单位铁损耗值是按 Epstein方圈法对条料试品进行测试，但在材料经过冲剪叠压后，受到很大的应力使损耗增加，此外由于齿槽的存在引起气隙齿谐波磁场在铁心表面引起空载高频损耗，这些都将导致电机制成后铁损耗显著地增加；因此，除了选择较低单位铁损耗的磁性材料外，尚须控制叠压压力和采取必要的工艺措施以降低铁损耗。图 3.6-5 表示了英国 Brook Hanson 公司采用了新的磁性材料并改进了制造工艺后单位铁损耗的

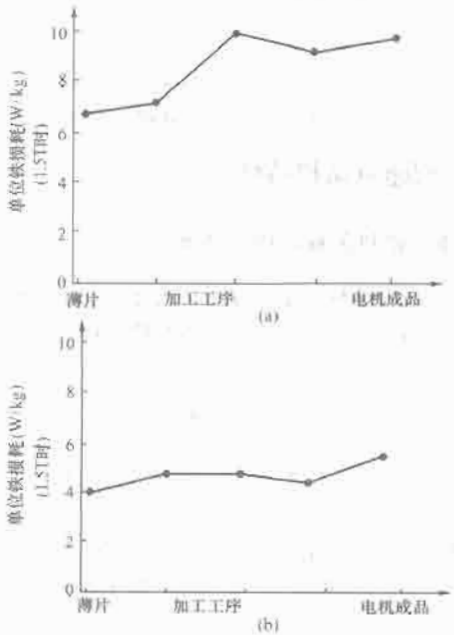


图 3.6-5　加工对单位铁损耗的影响
（a）原有的磁性材料和制造工艺；
（b）新的磁性材料和制造工艺

变化曲线与原有材料和工艺的对比情况。由于冲剪应力对铁损耗影响较大，因此对冲片进行热处理可降低 10%～20% 的铁损耗，这对于高牌号和较薄的硅钢片更为重要，因为这些材料对于应力的敏感程度远大于一般的磁性材料。鉴于价格和工艺的因素，目前在高效率电机的生产中，高牌号硅钢片和薄于 0.5mm 的硅钢片使用不多，一般仍采用低碳无硅电工钢片或低硅冷轧硅钢片。欧洲小电机部分过去有些制造商采用无硅电工钢片，其单位铁损值为 6.5W/kg，近年钢厂推出 Polycor420 电工钢片，其平均单位损耗为 4.0W/kg，甚至低于某些低硅钢片，该材料同时具有较高的磁导率。近年日本研制出牌号为 50RMA350 的低硅冷轧钢片，其成分中加入少量铝和稀土金属。从而在保持较高磁导率同时，降低损耗，其比损耗值为 3.12W/kg。这些将有可能为高效率电机的生产推广提供一较好的物质基础。

3.3　缩小风扇降低通风损耗

对于较大功率的 2、4 极电机，风摩损耗在总损耗中占有相当大的比例，如 90kW 2 极电机风摩损耗可达总损耗的 30%左右。风摩损耗主要由风扇消耗的功率所构成。由于高效率电机的热损耗一般较低，因此冷却用风量可减少，从而通风功率也可减少。通风功率约与风扇直径的 4～5 次方成比例，因此，在温升许可的情况下，缩小风扇尺寸可有效地降低风摩损耗。此外，通风结构的合理设计，对提高通风效率降低风摩损耗也是重要的。试验表明，高效率电机大功率 2 极部分风摩损耗较普通电机下降 30%左右。由于通风损耗下降幅度较大，而且不需增加多少费用，因此，改变风扇设计往往是这部分高效电机所采取的主要措施之一。

3.4　通过设计和工艺措施降低杂散损耗

感应电机的杂散损耗主要是由磁场高次谐波在定转子铁心和绕组中所产生的高频损耗。为降低负载杂散损耗可通过采用 Y-△串接的正弦绕组或其他低谐波绕组来降低各次相带谐波的幅值，从而降低杂散损耗。此外，可采用较多的定、转子槽数以降低齿谐波幅值，从而使这部分谐波引起的杂散损耗下降。在工艺上可通过转子槽绝缘处理工艺来降低转子中的高频横向电流损耗，也可通过冲出气隙工艺来改变表面高频损耗。

3.5　改进压铸工艺降低转子损耗

通过控制转子铸铝时的压力、温度以及气体排放路径等措施，减少转子导条中的气体，从而提高电导率，降低转子铝耗。近年来美国已研制成功铸铜转子压铸设备及相应的工艺。计算表明，如以铸铜转子取代铸铝转子，转子损耗可下降 38%。但此时应注意转子电阻的下降会引起起动转矩的下降，因此为了保持一定的起动转矩，铸铜转子损耗的下降将会受到一定的制约。

3.6　应用计算机优化设计降低损耗提高效益

除了增加材料、提高材料性能以及改进工艺外，采用计算机优化设计，在满足成本、性能等约束条件下，合理确定各项参数，从而获得效率的最大可能提高。采用优化设计将可显著缩短电机设计的时间并可提高电机设计的质量。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 7 章 感应电动机变频调速及双馈调速

1 变频调速控制方式

根据感应电动机转速表达式

$$n=\frac{60f_1}{p}(1-s)$$

可见，感应电动机的调速有 3 种基本方法：①改变极对数 p；②改变转差率 s；③改变电源频率 f_1，即变频调速。感应电动机变频调速时，转差率变化较小，其转差功率基本不变，与其他调速方法相比，这种方法效率最高，性能最好。

根据感应电动机的基本理论，因定子漏阻抗一般很小，所以有

$$E_1=4.44f_1N_1K_{dp1}\Phi_m\approx U_1 \tag{3.7-1}$$

式中，N_1K_{dp1} 为定子绕组每相有效串联匝数；Φ_m 为每极气隙磁通量。

为了保证变频调速时感应电动机的运行性能，一般要求保持气隙磁通 Φ_m 基本恒定，所以变频的同时必须改变电压。因此，变频调速系统通常被称为变压变频（VVVF）调速系统。在频率变化的同时，电压控制主要有以下几种方式。

1.1 额定频率以下的电压控制方式

当频率 f_1 在额定频率 f_{1N} 以下变化时，常用的电压控制方式有三种：

（1）恒压频比控制（$U_1/f_1=C$）

恒压频比控制就是在变频时，控制相应电压的变化，保持电压和频率之比 U_1/f_1 等于常数。当忽略定子漏阻抗上的压降时，由式（3.7-1）可知，$\Phi_m\propto U_1/f_1$，因此，若保持 $U_1/f_1=U_{1N}/f_{1N}=$常数，就可以维持气隙磁通 Φ_m 基本恒定。但是，随着频率下降，特别是降至较低时，定子电阻上的压降影响逐渐加大，使 E_1 与 U_1 的差别将越来越明显，此时，即使 U_1/f_1 不变，但由于定子电阻压降影响，致使磁通比额定时要小很多。所以，采用这种控制方式时，感应电动机在低频时的性能较差，输出转矩较小。为了解决这一问题，通常在低频时，适当提高变频器输出电压，以补偿定子电阻的压降，达到维持磁通基本不变的目的。

（2）恒气隙磁通控制（$E_1/f_1=C$）

根据式（3.7-1），若保持 $E_1/f_1=C$，便可以使气隙磁通 Φ_m 保持恒定。若气隙磁通基本不变，在转子有功电流保持不变的情况下，就可以保持电磁转矩基本不变，即为恒转矩调速。然而，所能控制的量是电压 U_1，U_1 等于 E_1 加上定子漏阻抗的压降。因此，一般根据不同负载情况，采用带定子压降补偿的恒压频比控制方式，但要做到严格的补偿实际上往往是比较困难的。

（3）恒转子全磁通控制（$E_r/f_1=C$）

在低频时，若适当提高补偿电压 U_1，以补偿转子漏抗上的压降，从而使 E_r/f_1 等于常数，此时感应电动机的机械特性与直流电动机的机械特性类似。这种状态下电动机的特性最好，因此，是目前高性能交流调速系统所追求的目标。这里，E_r 为感应电机等效电路中转子侧的电阻压降分量，所对应的磁通是气隙磁通 Φ_m 减去转子漏磁通，称为转子全磁通，所以这种控制就称为恒转子全磁通控制或恒转子磁通控制。

1.2 额定频率以上的电压控制方式

当变频器输出频率 f_1 高于额定频率 f_{1N} 时，由式（3.7-1）可知，若还要保持 Φ_m 不变，则电压 U_1 应升高，将高于额定电压 U_{1N}。这样，一方面影响电机及元器件的耐压，另一方面提高变频器输出电压（超过额定电压）比较困难。因此，通常在频率高于额定频率时，电压保持额定电压不变。此时，电机气隙磁通 Φ_m 将随着频率的升高而成反比下降。在转子有功电流保持不变的情况下，根据感应电动机的基本理论可知，电磁转矩 $T_{em}\propto\Phi_m\propto 1/f_1$，而电动机的电磁功率 $P_{em}=\Omega_1T_{em}\propto 2\pi f_1T_{em}\approx C$（常数）。此时，电动机的输出功率也就近似不变，故这种控制方式称为近似恒功率调速。

1.3 控制特性 $U_1=f(f_1)$

根据在不同频率范围内的各种控制方式特点，可得到感应电动机变频调速时的控制特性 $U_1=f(f_1)$ 如图 3.7-1 所示。其中，ab 段为带定子压降补偿的特性，在此区间，磁通基本恒定，相应的磁通 $\Phi_m=f(f_1)$ 特性如图所示。

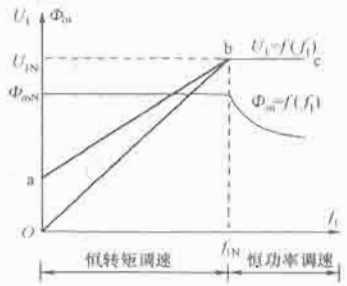


图 3.7-1 感应电动机变频调速控制特性

2 变频调速电动机特性

2.1 感应电动机固有的机械特性

根据感应电动机的基本理论，当外加电压和频率固定不变时，由本篇第 2 章感应电机工作原理可知，电磁转矩表达式为

$$T_{em}=\frac{pm_1U_1^2\dfrac{R_2'}{s}}{2\pi f_1\left[\left(R_1+\dfrac{\sigma_1R_2'}{s}\right)^2+(X_1+\sigma_1X_2')^2\right]} \tag{3.7-2}$$

式中，各符号定义见本篇第 2 章。由此可得感应电动机机械特性 $T_{em}=f(s)$，如图 3.7-2 所示。其中，出现最大转矩的转差率为

$$s_m=\pm\frac{\sigma_1R_2'}{\sqrt{R_1^2+(X_1+\sigma_1X_2')^2}} \tag{3.7-3}$$

最大转矩为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$T_{max}=\pm\frac{m_1 pU_1^2}{4\pi f_1\sigma_1\left[\pm R_1+\sqrt{R_1^2+(X_1+\sigma_1 X_2')^2}\right]} \tag{3.7-4}$$

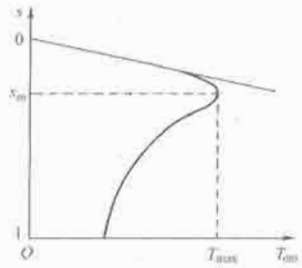


图 3.7-2　感应电动机固有机械特性

2.2　恒压频比控制时的机械特性

变频调速时，若定义变频比为

$$\alpha=f_1/f_{1N}$$

则当采用恒压频比（$U_1/f_1=$C）控制时有

$$f_1=\alpha f_{1N}$$

$$U_1=\alpha U_{1N}$$

1）理想空载转速为

$$n_0=\frac{60f_1}{p}=\frac{60\alpha f_{1N}}{p}=\alpha n_{0N}$$

2）机械特性直线段斜率。若忽略定子电阻，由式（3.7-2）式可知，变频时若要求电磁转矩不变，就应保持 $s\alpha$ 不变，由

$$s\alpha=\frac{\Delta n}{n_0}\alpha=\frac{\Delta n}{n_{0N}}$$

可见，$s\alpha$ 保持不变时，同一负载转矩下的绝对转速降不变，也即机械特性的直线段斜率不变。

3）最大转矩。由式（3.7-4），当忽略定子电阻，并令 $\sigma_1=1$ 时，有

$$T_{max}=\frac{m_1 p}{4\pi f_1}\frac{U_1^2}{X_1+X_2'}=\frac{m_1 p}{4\pi\alpha f_{1N}}\frac{\alpha^2U_{1N}^2}{\alpha(X_{1N}+X_{2N}')}=T_{maxN}$$

式中，T_{maxN} 为额定电压、额定频率时的最大转矩，由此说明恒压频比控制且不计定子电阻时，最大转矩将保持不变。

实际考虑定子电阻时，由式（3.7-4）可以进一步分析得知，最大转矩将随 α 的下降而减小。由上述结论可得不同情况下的机械特性分别如图 3.7-3 和图 3.7-4 所示。

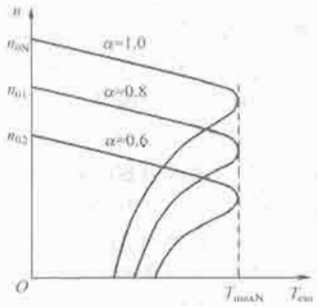


图 3.7-3　恒压频比控制（不计定子电阻的影响）

2.3　恒气隙磁通控制时的机械特性

若保持 $E_1/f_1=$C，即气隙磁通恒定时，由感应电机的等效电路，电磁转矩的表达式为

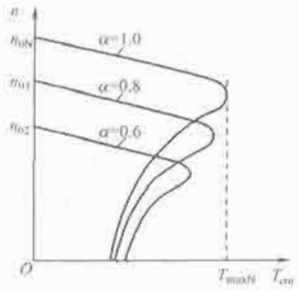


图 3.7-4　恒压频比控制（计定子电阻的影响）

$$T_{em}=\frac{m_1 p}{2\pi f_1}I_2'^2\frac{R_2'}{s}=\frac{m_1 p}{2\pi f_1}\frac{E_1^2R_2'/s}{(R_2'/s)^2+X_2'^2}$$

$$=m_1 p\left(\frac{E_1}{2\pi f_1}\right)^2\frac{2\pi f_{1N}s\alpha R_2'}{(R_2')^2+(s\alpha X_{2N}')^2} \tag{3.7-5}$$

最大转矩为

$$T_{max}=\frac{m_1 p}{4\pi f_1}\frac{E_1^2}{X_{2N}'}=\frac{m_1 p}{2}\left(\frac{E_1}{2\pi f_1}\right)^2\frac{\omega_{1N}}{X_{2N}'} \tag{3.7-6}$$

式中，$\omega_{1N}=2\pi f_{1N}$ 为额定角频率。由式（3.7-6）可知，在恒气隙磁通控制的变频调速过程中，若总转矩不变，则 $s\alpha$ 不变，亦即感应电动机的机械特性曲线的斜率不变，最大转矩与变频比 α 无关，为一个恒定常数。因此，这种控制下的机械特性与不计定子电阻影响时的恒压频比控制机械特性相同，如图 3.7-3 所示。

2.4　恒转子全磁通控制时的机械特性

根据等效电路，若用 E_1 减去转子漏抗压降后的相应电动势 E_r 表示的电磁转矩表达式为

$$T_{em}=\frac{m_1 p}{2\pi f_1}I_2'\frac{R_2'}{s}=\frac{m_1 p}{2\pi f_1}\left(\frac{E_r}{R_2'/s}\right)^2\frac{R_2'}{s}$$

$$=m_1 p\left(\frac{E_r}{2\pi f_1}\right)^2\frac{s\alpha\omega_{1N}}{R_2'} \tag{3.7-7}$$

当保持 $E_r/f_1=$C 时，由式（3.7-7）可见，在某一确定的变频比 α 下，$T_{em}\propto s$，即其机械特性为一直线。此时，感应电机机械特性不再拐弯、没有最大转矩的限制，如图 3.7-5 所示。

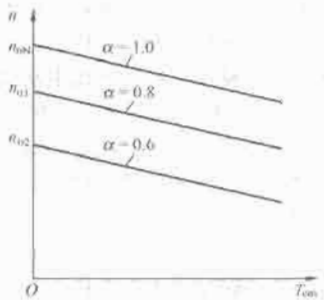


图 3.7-5　恒转子全磁通控制的机械特性

2.5　额定频率以上恒电压控制时的机械特性

当频率超过额定频率，即 $f_1>f_{1N}$，若保持变频电源输出端电压为电动机的额定电压不变，此时为恒功率运行，根据感应电动机电磁转矩与频率的关系可知，最大转矩 T_{max} 将随着频率的升高而下降，其转矩特性的直线段斜率也将随之变大，机械特性曲线逐渐变软，如图 3.7-6 所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

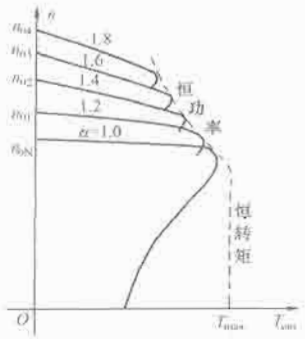


图 3.7-6 感应电动机在 $f_1 > f_{1N}$，$U_1 = U_{1N}$ 时的机械特性

3 变频调速感应电动机电磁设计特点

3.1 变频调速感应电动机的主要问题

变频调速感应电动机与常规正弦波供电的感应电动机相比，变频电动机的主要特点在于：一方面是通过变频器供电的电源波形是非正弦的；另一方面是电动机从低速到高速的宽频范围内运行。因而给这种电动机运行带来以下一系列问题：

1）电动机的损耗增加、温升增高。不论哪种型式的变频器，在运行中均产生不同程度的高次谐波电压和电流，使电动机在非正弦电压、电流下运行。其中，谐波分量对感应电机的运行性能会产生显著影响。就目前使用比较普遍的电压型 PWM 变频器而言，其低次谐波电压基本上为零，但含有丰富的高次谐波，这些高次谐波会引起电动机定子铜损耗、转子铜（铝）损耗、铁损耗及附加损耗的增加，最为显著的是转子铜（铝）损耗。因为感应电动机是以接近于基波频率所对应的同步转速旋转的，因此，高次谐波电压引起的谐波磁场以较大的转差速度切割转子导条后，便会产生很大的转子损耗。除此之外，还需考虑因集肤效应所产生的附加铜损耗。这些损耗都会使电动机额外发热，效率降低，输出功率减小，如将普通三相感应电动机运行于变频器输出的非正弦电源条件下，其效率将下降 1%～3%，温升一般要增加 10%～20%。

2）引起浪涌电压和电晕现象、损害绝缘。变频器中元器件不断换流产生浪涌电流，将引起较高的浪涌电压。目前中小型变频器，不少是采用 PWM 的控制方式。其载波频率为从几千赫兹到十几千赫兹，这就使得电动机定子绕组要承受很高的电压上升率，即 du/dt 值很高，相当于对电动机施加陡度很大的冲击电压，这会对电机的绝缘产生影响，致使线圈绝缘加速老化，同时还将伴随有电晕现象，危及线圈对地绝缘。

3）产生附加谐波电磁噪声与振动。由于变频电源存在一系列高次谐波，这些谐波将在电动机中产生附加的电磁激振力，引起附加的电磁振动和噪声。当电磁力波的频率和电动机机的固有振动频率一致或接近时，将产生共振现象，从而加大噪声。由于电动机工作频率范围宽，转速变化范围大，各种电磁力波的频率很难避开电动机组的固有振动频率，这样就更容易出现较大的电磁振动和噪声。

当电动机由电流型变频器供电时，各次谐波电流的幅值与其次数成反比，产生噪声的激振的频率偏离电动机定子有效部分的固有频率。因而当电动机在恒定磁通和恒定电流状态下运行时，噪声级的增长处于同一范围之内，变频器的控制器件和电动机的设计对噪声增长的影响很小。与常规正弦电源供电运行相比，在额定电压、额定频率下运行时，电流型变频器供电电动机的 A 计权噪声级增长量在 1～6dB 之间。

当电动机由电压型变频器供电时，各次谐波电压频率接近变频器的脉冲频率或其倍数，噪声激振力的幅值随着变频器控制方式而变化。与常规正弦波电源供电运行相比，电压型变频器供电电动机的 A 计权噪声级的增长比电流型变频器供电时更大，在恒定磁通的情况下，其增量可达 1～15dB。

4）产生脉动转矩。由谐波产生的稳态异步转矩对电动机运行的影响较小，而谐波引起的脉动转矩，特别是低速时，低频脉动转矩将造成速度波动，对电动机低速稳定运行产生不良影响。

5）产生轴电压和轴电流。电机轴电压主要是由于磁路不对称和静电感应现象引起的，在普通电动机中一般并不严重。在变频供电的电动机中，因电源谐波的影响而较为突出，当轴电压过高时，将对轴与轴承间的油膜造成破坏，从而影响轴承的寿命。

6）低速运行的散热与冷却问题。变频调速电机低速运行时，若采用普通电动机的自扇冷却方式，则冷却风量将随着转速下降而大大减小，散热效果将大大降低。因此，该种调速电机必须采用其他冷却方式。

3.2 变频感应电动机的设计特点

对普通正弦供电感应电动机来说，在设计时主要考虑的性能参数是过载能力、起动性能、效率和功率因数。而变频电动机，可以根据起动和负载的要求，控制变频输出，对过载能力和起动性能不再需要过多考虑，而要解决的关键问题是如何改善电动机对非正弦波电源的适应能力。主要有以下设计特点：

1）用于变频调速的感应电动机要求其工作频率在一定范围内可调，所以设计电机时不能仅仅考虑某单一频率下的运行特性，而要求电机在较宽的频率范围内工作时，均有较好的运行性能。如目前大多调速感应电动机的工作频率在 5～100Hz内可调，设计时要全面考虑。

2）变频电机在低速时降低供电频率，可以把最大转矩调到起动点，获得很好的起动特性，因而在设计变频电机时不需要对起动性能作特别的考虑，转子槽形不必设计为深槽，从而可以重点进行其他方面的优化设计。

3）变频电机通过调节电压和频率，在每一个运行点都可以有多种运行方式，对应多种不同的转差频率，因而总能找到最佳的转差频率，使电机的效率或功率因数在很宽的调速范围内都很高。因而，变频电机的功率因数和效率可以设计得更高，功率密度得以进一步提高。

4）变频电动机的电磁负荷是在常规电机设计的范围内选取。为了控制由于谐波磁通引起的磁路饱和，特别是当运行在低速时采用不同压频比（补偿控制），更有可能造成磁路的饱和。另外，在频率比较高时，降低气隙磁通密度 B_δ 可降低齿、轭的铁损耗，所以变频电动机设计时一般选择较低的磁通密度，这也有利于保证变频电动机应有的效率和功率因数。同时，应选用导磁性能更好、损耗更低的冷轧硅钢片，有利于提高磁负荷能力，降低温升。

5）绝缘等级。一般为 F 级或更高，加强对地绝缘和线匝间的绝缘强度，特别要考虑绝缘耐冲击电压的能力。

6）针对电机的振动、噪声问题，要充分考虑电动机构

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

件及整体的刚性，尽力提高其固有频率，以避开与各次力波产生共振。

7）冷却方式。一般采用强迫通风冷却，即主电机散热风扇采用独立的电机驱动，以避免低速运行时温升过高。

8）变频供电时产生的轴电压和轴电流会使电机轴承失效，缩短轴承使用寿命，必须在设计上要加以考虑。对较小的轴电流，可以适当增大电机气隙和选用专用润滑脂；另外，增加轴承的电气绝缘或者将电机轴通过电刷接地，可以有效解决轴承损坏问题；对过高轴电压，应设法隔断轴电流的回路，如采用陶瓷滚子轴承或实现轴承室绝缘。同时，在逆变器输出端增加滤波环节，降低脉冲电压 du/dt 也是一种有效的方法。

3.3　变频感应电动机设计方法

3.3.1　电磁负荷的选取

变频电机设计选择电磁负荷（A、B_δ）时，主要考虑以下因素：

1）效率与温升。变频供电情况下，由于谐波的影响，导致铁损耗、铜损耗及其他损耗增加。若正弦波对应的铁损耗与转子表面损耗分别为 P_{Fe} 和 P_s，则由于电源谐波引起铁损耗的增加量为

$$\Delta P_{Fe}=P_{Fe}\sum\frac{a_\nu^{1.6}}{\nu^{0.2}}$$

式中，a_ν 为第 ν 次谐波的含有率；ν 为谐波次数。

电源谐波引起转子表面损耗的增量为

$$\Delta P_s=P_s\sum\frac{a_\nu^2}{\nu^{0.5}}$$

由于高次谐波电流的集肤效应，将引起导体内电流分布不均匀，从而使交流电阻增大，铜损耗增加。同时，高次谐波还将引起定转子端部附加漏磁损耗，一些杂散损耗也将增加。

总之，变频供电的感应电机，由于电源谐波的影响，相比正弦波供电时的总损耗将增加约 30%，导致其效率下降 1%～3%。

因此，在同等效率和温升要求的条件下，变频电机设计时应选择较低的电磁负荷 A（线负荷）和 B_δ（气隙磁通密度）值。

2）变频器的类型。电机电磁负荷的选取还应考虑变频电源的类型，对于电压型逆变器电源供电时，谐波电流大小主要取决于电动机的漏抗，漏抗越大，谐波电流及脉动转矩将越小。因此，为了减小谐波电流，希望适当增大电动机的漏抗。而漏抗与 A/B_δ 成正比，为了获得较大的漏抗，应选择较大的 A/B_δ。

根据感应电动机的励磁电流与电磁负荷间的关系

$$I_m\propto\frac{\delta B_\delta}{\tau A}$$

式中，δ 为有效气隙长度；τ 为极距。

可见，当 A/B_δ 较大，则励磁电流较小，此时功率因数就越高。由此，同样也应该选择较大的 A/B_δ 值。

当采用电流型逆变器变频供电时，为了减小换流时间，降低换流时出现的过电压，要求换流回路中的电感越小越好。电动机的漏电感是换流回路电感的一部分，所以在这种情况下要求电动机的漏感越小越有利。根据上面关系，对于电流型逆变器供电感应电动机，为了获得较小的漏抗，应选择较小的 A/B_δ 值。但 A/B_δ 较小时，相应的励磁电流会增大，将使功率因数下降，因此需要综合考虑。

3.3.2　额定电压的选择

对于变频调速电机来说，额定电压不仅是电机设计的主要依据，同时应根据变频器的特点及其经济性综合考虑。变频感应电动机额定电压的取值受到其控制方式、漏阻抗大小、系统的过载倍数及逆变器最高输出电压等因素的制约。

电动机漏电抗与每相绕组有效匝数的二次方成正比，额定电压越高，绕组匝数就应越多，此时漏抗将越大。根据前面所述，电压型逆变器供电时就要求电动机漏抗较大，因此对于电压型逆变器供电的感应电动机，应选择较高的额定电压。对于电流型逆变器供电的感应电动机则正好相反，应选择较低的额定电压。

3.3.3　极对数的选择

感应电动机的同步转速 $n_s=60f_1/p$，由此可见，当电动机最高速度确定后，变频输出的频率 f_1 和电动机极对数 p 之比就已确定。从电机本身来讲，在转矩为一定值的情况下，若极对数较多，则在相同的铁心内径情况下，可缩短绕组端部长度，减小定子用铜量和铜损耗。同时较多的极对数，相同尺寸下铁心轭部磁通密度较低，即若保持相同的磁通密度，则可以减小定子及转子铁心的轭高，也就是可以减小定子外径，从而节省硅钢片等用铁量。但是，电动机的最大转矩与极对数成反比，因而极对数将有一定的上限。

当电动机的极对数一定时，其最高转速与最低转速之比就等于变频器输出的最高频率与最低频率之比。但若频率太低，较低的换流频率将引起较大的转矩脉动，所以低速时对应的频率不能太低，即有一个下限。这样，要获得较大的调速范围，就必须增大高速时的频率，相应的也就应增多电机的极对数 p。例如，一台电机 $p=1$，为了得到最高转速接近于 3000 r/min，变频输出的最高频率 $f_{max}=50$Hz，若其最低转速的允许频率 $f_{min}=5$Hz，则该电机的调速比为 50/5=10。若选电机的极对数为 3，同样要求最高转速为 3000 r/min，对应的最大频率 $f_{max}=150$Hz，而最低频率限制不变，则此时的调速比为 150/5=30。因此，增多电机的极对数便可以增大其调速范围。当然，极对数较多，频率也就较高，则逆变器换流次数增加，使功率器件换流损耗增加，故电机的极对数也有一个上限。

根据上面分析，变频感应电动机的极对数不宜取 $p=1$，也不宜太多，一般选 $p=2\sim4$，通常，大多数情况选 $p=2$ 或 $p=3$。

3.3.4　电动机参数的选取

电动机参数是决定电动机和变频器运行综合性能的主要因素，合理设计电动机参数是提高系统整体性能指标的技术关键。

（1）漏抗的确定

由于变频器供电时电源谐波的明显影响，变频电机设计时对谐波的抑制十分重要。由感应电动机等效电路可知，在给定电压下，电机电流由其参数、转差率及电源频率决定。对应于其基频电压，电机通常在低转差率下运行，而对应高次谐波电压则相当于运行在堵转状态，因此高次谐波电流主要由高次谐波电压和定、转子漏抗决定。当变频器输出高次谐波电压一定时，增大电动机漏抗，是减小谐波电流的有效措施。但是，若电机漏抗过大，将使电机参数不合理，造成电机体积增大，成本上升，并可能对系统其他性能带来不利影响。

电动机设计时，通常根据变频器的控制方式，以及一定的谐波电流含量要求，确定电机总漏抗的最小允许值。若最大脉动电流幅值较小时，当采用 SPWM 逆变器双极性工作

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

时，电动机基波总漏抗的标么值应满足以下关系

$$X_k^* \geqslant \frac{\sqrt{1-m_0^2}}{m_0} \frac{1-m_0^2}{1+2\sum_{j=1}^{m}(-1)^j\cos\alpha_j} \times \sqrt{\sum_{\nu}\left[\frac{1+2\sum_{j=1}^{m}(-1)^j\cos(\nu\alpha_j)}{\nu^2}\right]^2} \tag{3.7-8}$$

式中，X_k^* 为总漏抗，$X_k = X_1 + X_2'$；ν 为谐波次数；α_j 为第 j 次切换时的角度；m 范围内切换点数；m_0 额定运行时定子电流的谐波含量与定子电流有效值之比。

$$m_0 = \frac{\sqrt{I_5^2 + I_7^2 + \cdots + I_\nu^2 + \cdots}}{\sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + \cdots + I_\nu^2 + \cdots}}$$

实际变频感应电动机设计时，在槽形设计上应做到尽量增加定子阻抗以抑制高次谐波，转子槽形选择上要考虑谐波集肤效应的影响，槽面积尽可能大，槽形宜浅不宜深，槽形总体上是上宽下窄，采用半闭口槽等。变频调速电机无论是低压小容量还是高压大容量，都应普遍采用简单的平行齿槽形，常用的有圆底槽、平底槽、梨形槽等，如图 3.7-7 所示。

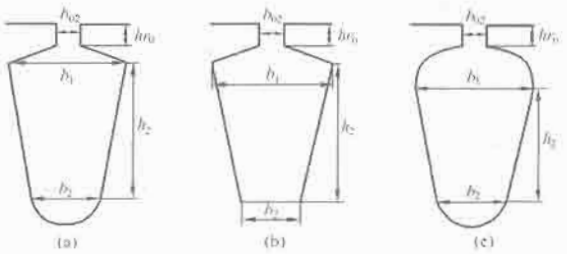


图 3.7-7 变频电机常用槽型

(a) 圆底槽；(b) 平底槽；(c) 梨形槽

另外，可采用闭口槽以增大转子槽漏抗，抑制高次谐波电流，降低脉动转矩。同时采用闭口槽可减小谐波的影响，可使谐波激振力降低，加上气隙长度的优化设计，也可降低电磁噪声。

(2) 定、转子电阻的确定

绕组设计时，尽可能选择较大的导体截面积，以减小定子和转子电阻。减小定子电阻即可降低基波铜损耗，以弥补高次谐波引起的铜损耗增加。但是，转子电阻的减小将使转差率减小，从而增大了提高转差控制精度的困难。所以，转子电阻的减小，受到转差控制技术和控制精度要求的限制。

(3) 集肤效应对定、转子参数的影响

变频电源谐波频率一般较高，高次谐波引起的集流效应对定、转子电阻和漏抗的影响较工频电源供电时更为显著。电机的集肤效应将使定、转子电阻增大，而使漏抗减小。

考虑集肤效应时，ν 次谐波的定子电阻和漏抗可按下式近似计算

$$R_{1\nu} = R_1\xi_{1\nu} \quad X_{1\nu} = \frac{1.5X_1}{\xi_{1\nu}}$$

式中，R_1 为未计及集肤效应时定子每相电阻；X_1 为相应频率下未计及集肤效应时定子每相漏抗；$\xi_{1\nu}$ 为 ν 次谐波频率下集肤效应对定子电阻和漏抗影响的修正系数。

$$\xi_{1\nu} = 0.1987h_1\sqrt{\frac{\omega_\nu\nu}{2\pi\rho_1}}$$

式中，h_1 为定子导体等效高度；ρ_1 为定子导体的电阻系数；ω_ν 为 ν 次谐波的角频率。

ν 次谐波的转子电阻和漏抗也可类似按下式近似计算

$$R_{2\nu} = R_2\xi_{2\nu} \quad X_{2\nu} = \frac{1.5X_2}{\xi_{2\nu}}$$

式中，R_2 为未计及集肤效应时转子每相电阻；X_2 为相应频率下未计及集肤效应时转子每相漏抗；$\xi_{2\nu}$ 为 ν 次谐波频率下集肤效应对转子电阻和漏抗影响的修正系数

$$\xi_{2\nu} = 0.1987h_2\sqrt{\frac{\omega_\nu\nu}{2\pi\rho_2}}$$

式中，h_2 为转子导体等效高度；ρ_2 为转子导体的电阻系数。

3.3.5 谐波转矩的影响及其对策

当电机电流中存在谐波时，这些谐波不仅会在电机中产生谐波损耗，影响效率和温升，还将产生一系列谐波转矩，包括恒定谐波转矩和脉动谐波转矩。恒定谐波转矩，是由气隙谐波磁场与由此谐波磁场感应出的转子谐波电流相互作用而产生的。其中，5，11，17，…次恒定谐波转矩与转向相反，而 7，13，19，…次恒定谐波转矩与转向相同，这两个方向的恒定谐波转矩相互抵消后，余下的恒定谐波转矩一般很小，对电动机的运行影响不大。

脉动谐波转矩，是由气隙磁场与不同于该磁场次数对应的转子谐波电流互相作用产生的。谐波转矩对感应电动机正常运行虽然影响不大，但在基波频率很低情况下，当换流频率过低时，感应电动机的脉动转矩将引起转速的波动现象。特别是传动系统机械惯性较小时，尤为如此。因此，低频下的脉动转矩使电动机的最低转速有一个下限。此外，谐波转矩还将产生电磁振动和噪声。因此，为了减小电动机的谐波转矩影响，在电动机设计时应采取一些特殊措施。例如，转子采用闭口槽，不仅减少了转子齿槽引起定子齿表面磁场脉动产生的附加损耗，同时由于采用闭口槽使漏抗大大增加，有效抑制高次谐波电流，从而降低脉动转矩。

4 双馈感应电动机调速

4.1 调速原理

任何一种电机正常运行时，其定、转子磁场在空间上均相对静止，通过气隙磁场传递电磁功率。双馈感应电动机是采用绕线转子感应电动机，其定子供给固定频率的工频电源，转子侧通过变频器向转子提供频率、幅值和相位可变的交流电源（双向馈电），其调速系统的主电路如图 3.7-8 所示。由于定、转子三相绕组分别接到两个独立的三相对称电源，这时绕线转子感应电动机在运行原理上实际变成了一台同步电动机。

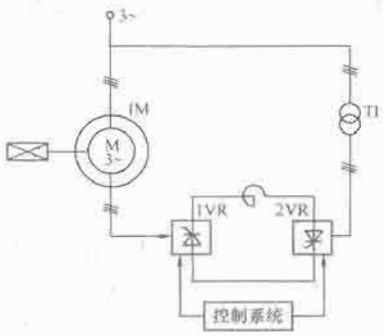


图 3.7-8 双馈电机调速系统的主电路

设定子电源频率为 f_1，对应的同步转速为 n_s，转子经变频器变换后输入的电压、电流频率为 f_2。当转子三相电流相序与定子电流相序相同时，转子电流产生的旋转磁动势 F_2 相对于转子的转速为 n_2，旋转方向与定子磁动势旋转方

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

向相同，则转子转速 n 低于同步转速，为

$$n=n_s-n_2$$

此种状态称为次同步运行。当转子电流相序与定子电流相序相反时，转子磁动势 F_2 相对于转子的旋转方向反向，转子转速 n 将高于同步转速，其值为

$$n=n_s+n_2$$

此种状态称为超同步运行。当转子频率 $f_2=0$，即转子通入直流时，$n=n_s$，则是同步运行状态，这是典型的同步电动机。显然，改变转子电流频率 f_2，即可改变电动机的转速。

双馈电动机在控制系统的控制量固定不变，即 f_2 不变时，电动机的转速不会随负载的变化而变化，其机械特性是一条与同步电动机相同的水平直线。由于双馈电动机从原理上是按同步电动机方式运行，因此，它也与同步电动机一样，存在转子振荡、失步现象等问题。

4.2　功率关系

根据能量平衡的关系可导出电动机状态下，定子侧通过气隙磁场传递给转子的电磁功率 P_{em} 与电动机轴上输出的总机械功率 P_m 的关系如下

$$P_m=(1-s)P_{em}$$

当转子转速 n 低于同步转速，转差率 s 为正时，转子输出有功功率即为转差功率 sP_{em}，转子侧的电源是吸收有功功率；而在转子转速 n 超过同步转速，即转差率 s 为负时，转子输入有功功率 sP_{em}，转子侧的电源输出有功功率，如图 3.7-9 所示。

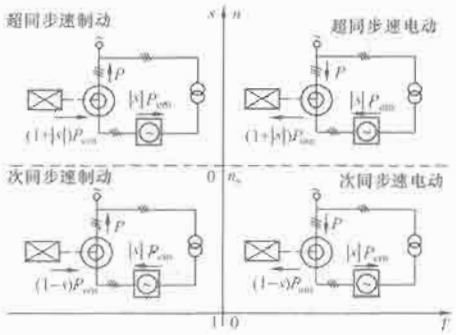


图 3.7-9　双馈电动机的能量传递关系

双馈电动机调速系统可在Ⅰ，Ⅱ象限运行，能在任意转速下实现回馈制动，提高了系统的动态性能。在Ⅱ象限的回馈制动运行，实质上是运行在发电状态下，其功率关系为转子转速 n 低于同步转速时，转差率 s 为正，轴上的机械功率为输入，转子的转差功率也是输入，转子侧的电源是输出有功功率；转子转速 n 超过同步转速时，转差率 s 为负，轴上的机械功率仍为输入，而转子的转差功率是输出，转子侧的电源是吸收有功功率，如图 3.7-9 所示。这就需要图 3.7-8 中 1VR 与 2VR 组成的变频器的能量传输是双向的。

从上述可知，双馈调速是一种可以实现高效改变转差的调速方法，较传统的转子外接电阻来改变转差的方法，效率可以大为提高。因为接在转子侧的变频电源只需要调节转差功率，在调速范围比较小的情况下，转差功率也是比较小的，与从定子侧直接变频的调速系统相比，所需变频器的容量将大为减少，降低了系统的造价。

4.3　磁场定向矢量控制

为了改善双馈电机的运行性能，需要对双馈电机进行闭环控制，也就是通过检测电网频率和转子角速度，使转子变频器输出频率自动跟踪转子转差频率，从而避免失步。双馈电机可以采用磁场定向的方法进行控制。磁场定向矢量控制基于电机的动态方程，通过控制电机电流矢量与定向磁场矢量的夹角和大小，实现对无功功率和有功功率的控制。

为了方便定子磁场定向矢量控制，常采用 $M-T$ 坐标轴系，把旋转坐标系的 M 轴选在定子磁链方向上，T 轴超前 M 轴 90°，即此时 T 轴上的定子磁链为零，由此可得到电磁转矩为

$$T_{em}=-\frac{3}{2}\frac{p}{2}\frac{L_m}{L_s}\Psi_{Ms}i_{Mr} \tag{3.7-9}$$

式中，Ψ_{Ms} 为定子磁链；i_{Mr} 为转子 T 轴电流；i_{Mr} 为转子 M 轴电流；p 为极对数；L_s 为 $M-T$ 坐标系下电机定子电感；L_m 为定转子之间的互感。

由式（3.7-9）可知，在定子磁场定向旋转坐标系下，转矩的大小仅取决于定子磁链的 M 轴分量（即定子磁链的幅值）和转子电流 T 轴分量的乘积，在定子磁链幅值稳定的情况下，电机转矩仅由转子电流 i_{Tr} 控制。

当双馈电机定子磁链幅值恒定时，定子侧的瞬时无功功率为

$$Q_s=\omega_s\Psi_{Ms}\left(\frac{\Psi_{Ms}}{L_S}-\frac{L_m}{L_s}i_{Mr}\right) \tag{3.7-10}$$

由式（3.7-9）和式（3.7-10）可知，在定子磁场定向旋转坐标系下，双馈电机的转矩和定子侧的瞬时无功功率分别由转子电流的转矩分量 i_{Tr} 和励磁分量 i_{Mr} 控制。换句话说，通过控制 i_{Tr} 和 i_{Mr} 的大小，可以控制电机的转矩和无功功率。同时还表明两个控制量之间没有交叉耦合关系。需要强调的是，这个结论是在定子磁链幅值恒定的前提下得到的。如果定子磁链有波动，转子转矩电流 i_{Tr} 也会影响定子无功功率，但一般来说，定子无功功率主要是由转子励磁电流 i_{Mr} 决定的。

双馈电机矢量控制系统的主电路可由交-直-交或交-交变频器构成，但能量传递必须是双向的。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第8章 多速三相感应电动机

1 基本原理和方法

1.1 基本原理

感应电动机的定子三相绕组接通三相交流电源后，在气隙中产生的旋转磁场转速为

$$n_s = \frac{60f}{p} \tag{3.8-1}$$

式中，n_s 为旋转磁场转速，r/min；f 为电源频率，Hz；p 为极对数。

因此，改变电机定子绕组的极对数，可以改变电机的转速。对于双速电机定子绕组可以采取两种方案：一种是采用极对数分别为 p_1 和 p_2 的两套独立绕组；另一种是采用一套绕组，通过改变绕组端部联结，分别构成不同的极对数 p_1 和 p_2。第一种绕组方案的优点是两套绕组分别按 p_1 和 p_2 对极设计，其磁动势谐波含量少，性能较好。缺点是两套绕组材料费用高，体积大，使用时两套绕组热胀冷缩不一致。第二种单绕组方案的优缺点恰好与第一种相反。研究单绕组变极方案的方法称为单绕组变极法。

单绕组变极法应遵守以下几点原则：

1）变前极与变后极绕组均应构成三相对称绕组。

2）绕组分布系数应尽可能高，以充分利用材料。

3）绕组引出线数应尽可能少，便于制造和接线。

4）绕组产生的磁动势谐波含量应尽可能少，谐波幅值尽可能小。

单绕组变极方法可分为两大类：一类为反向法，即组成变前极和变后极各相绕组的线圈不变，仅改变其中部分绕组线圈的电流方向，以达到变极的目的；另一类为换相法，即打破变前极各相绕组线圈原来的相属，重新分配给三相绕组。前者的优点是引出线少，多数情况下仅需6根，接线简单，应用较早也较广泛；缺点是有一种极数下的绕组分布系数较低。后者优缺点与前者正好相反。

1.2 槽号相位图

槽号相位图是代替槽矢量星形图用来分析绕组的重要方法。虽然槽矢量星形图直观，但画起来麻烦费时，槽矢量的号码往往互相交错，不易找出其规律性，槽数越多，越显得复杂，且无法用计算机处理。采用槽号相位图后，较好地解决了上述不足。

槽号相位图的构成是把槽矢量星形的圆周展开成直线，取消矢量，留下代表矢量的槽号，每个槽矢量变成一个槽号，这时，圆周变成一行直线分布的槽号，每个槽号在一行中的位置表示该槽矢量的相位，这样便得到“槽号相位图”，如图3.8-1所示。图中每一行由槽矢量图的一个圆周展开得到，代表360°电角度。第一对极的槽号画在槽号相位图的第一行，第二对极的槽号画在第二行。为使用方便，同时把负槽号（代表电流为负值的槽）也一并画出，其位置与同号码的正槽号相距180°电角度。同一列中的槽号相位相同。

设每极每相槽数为

$$q = \frac{N}{D} \tag{3.8-2}$$

式中，N、D 没有公约数。槽号相位图每行的格数是 $6N$，相邻槽号位移 D 格，正、负槽号总行数等于极数 $2p$。

1.2.1 每极每相整数槽绕组槽号相位图

对于 $Q=24$，$2p=4$，$q=2$ 每极每相整数槽绕组的槽号相位图，每行应为 $6N=6\times2=12$ 格，槽距角 $\alpha=360°/12=30°$ 电角度，共需4行，整数槽时 $D=1$。如图3.8-1所示，首先将第一槽画在第一格内，相邻第二槽位移 $D=1$ 格，画在第二格内，依此类推，画出全部正槽号。第一槽负槽号画在与其正槽号相距180°电角度的位置，其他的负槽号依此类推，画出全部负槽号。在双层等元件绕组里，每个槽号代表一个线圈。根据槽号相位图很容易构成60°相带的三相绕组，与槽矢量图相似画出三个60°电角度的相带，各相带互差120°电角度，由60°相带内的正负槽号组成一相绕组。三相对称绕组由下列各槽构成。

A相：1，2，13，14，−19，−20，−7，−8；

B相：5，6，17，18，−23，−24，−11，−12；

C相：9，10，21，22，−3，−4，−15，−16。

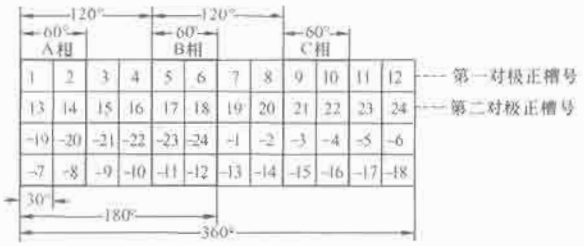


图3.8-1 $Q=24$，4极的槽号相位图

1.2.2 每极每相分数槽绕组槽号相位图

对于 $Q=18$，$2p=4$，$q=3/2$，每极每相分数槽绕组的槽号相位图。每行为 $6N=6\times3=18$ 格，共需4行，如图3.8-2所示。槽距角 $\alpha=360°/9=40°$。第一槽画在第一格内，相邻第二槽位移 $D=2$ 格，画在第三格内，依此类推，画出全部正槽号，其他同每极每相整数槽绕组。

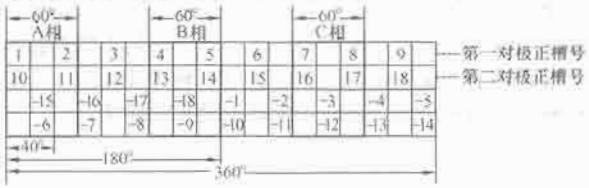


图3.8-2 4极18槽槽号相位图

对于给定的电机槽数和极对数，当槽号相位图出现周期性的分布时，则每个周期内的槽就构成一个单元电机。因此，在构成绕组时只需分析其中一个单元电机的槽号相位图，其他则只需重复这个单元电机的分配。对于单速电机的单元电机数 t，即是槽数 Q 和极对数 p 的最大公约数，单元电机的槽数为 Q/t，极对数为 p/t。对于单绕组双速电机的单元电机数 t 则是槽数 Q，变前极极对数 p_1，变后极极对数 p_2 三者的最大公约数，单元电机的槽数为 Q/t，变前极极对

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

数为 p_1/t，变后极极对数为 p_2/t。分析单速和双速电机绕组时，通常均采用单元电机来分析。

2　反向法变极绕组

反向法变极绕组是组成变前极和变后极各相绕组的线圈槽号不变，即不改变其相属，仅需改变变前极相绕组中部分线圈的电流方向，以达到变极的目的。通常引出线为 6 根，接线简单，应用较广泛，但变后极的绕组分布系数较低。

2.1　接线方法

通常把每相线圈的槽号按变极时是否改变电流方向分为两段，如 $A_Ⅰ$、$A_Ⅱ$、$B_Ⅰ$、$B_Ⅱ$ 和 $C_Ⅰ$、$C_Ⅱ$，其中下标Ⅰ的一段绕组不改变电流方向，而下标Ⅱ的一段绕组需改变电流方向，然后采用适当的联结方法，改变第Ⅱ段绕组中的电流方向以达到变极的目的。为减少电机的出线数，三相间的联结可采用并联联结，但每相两段并联联结绕组中的感应电动势，必须同大小、同相位。常用的联结法如图 3.8-3 所示。根据实际需要，还可采用 2△/Y，2Y/2Y 等联结法。

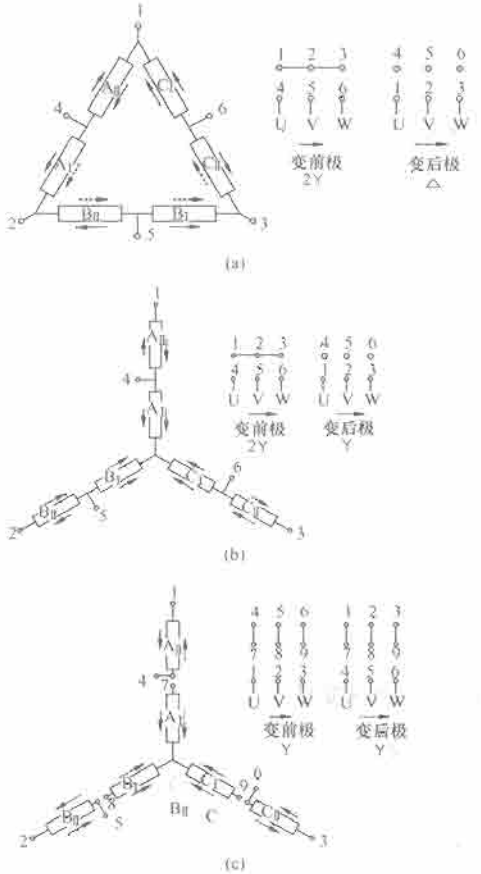


图 3.8-3　反向法变极绕组的常用联结法

(a) 2Y/△引出线 6 根；(b) 2Y/Y 引出线 6 根；(c) Y/Y 引出线 9 根

2.2　反向法变极步骤

假定绕组槽数是 Q，变前极的极对数为 p_1，当变前极各相绕组的槽号已知时，获取变后极 p_2 对极的绕组按如下步骤进行。

1) 画出变后极 p_2 对极的槽号相位图。

2) 分别画出变前极 A、B、C 各相绕组槽号在 p_2 对极时的相位分布图。

3) 在上述每相绕组槽号相位图上画一根轴线，三根轴线互差 120°电角度。

4) 按轴线左、右的 180°范围内，将变前极每相绕组槽号划分为Ⅰ和Ⅱ两段，如图 3.8-4 所示。

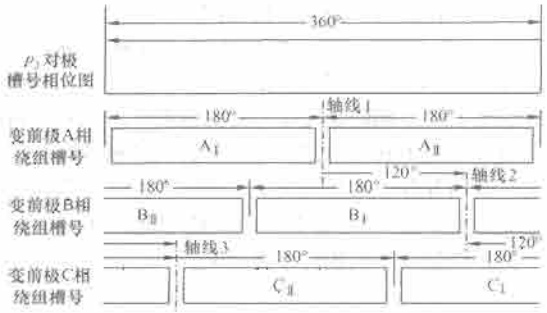


图 3.8-4　反向法变极示意图

两段绕组中电流按原定正方向时，得到变前极 p_1 对极，而当改变其中一段绕组（例如第Ⅱ段）的电流方向，使其与变前极电流方向相反时，得到变后极 p_2 对极。

在进行反向法变极时，三根轴线如何分配给三相绕组，决定于变后极的旋转方向。当变前极三相绕组 A、B、C 的空间相序为自左至右时，若轴线 1、2、3 亦是自左至右分别分配给 A、B、C 三相，则变后极的旋转方向与变前极一致，称为同转向方案。反之，若轴线 1、2、3 自左至右分别分配给 A、C、B 三相，则变后极的旋转方向与变前极相反，称为反转向方案。

根据理论分析，当已知变前极对数 p_1 和变后极对数 p_2 时，可预先判断哪种转向能够得到对称方案，其规律为：

1) $p_1 \neq 3k$，$p_2 \neq 3k$，$p_1 + p_2 \neq 3k$（$k=1, 2, \cdots$）同转向方案对称。

2) $p_1 \neq 3k$，$p_2 \neq 3k$，$p_1 + p_2 = 3k$（$k=1, 2, \cdots$）反转向方案对称。

3) $p_1 \neq 3k$，$p_2 = 3k$（$k=1, 2, \cdots$）同转向和反转向方案均对称。

4) $p_1 = 3k$，$p_2 \neq 3k$（$k=1, 2, \cdots$）没有对称方案。

因此，在画三根轴线时，需根据上述规律决定三根轴线的分配。对于第四种情况，为得到对称方案，将变前极和变后极对调即可。

2.3　变前极为正规接法绕组的反向法变极

由 2.2 节可知，只要给出变前极的三相绕组槽号，便能按前述步骤直接找到变后极方案。为了获得较大的分布系数和减少谐波含量，变前极大多采用 60°或 120°相带正规接法的整数槽或分数槽绕组，保证变前极绕组具有较好性能。

在进行反向法变极时，须先判断变后极的转向。若为同转向方案，应从左到右依次把三根轴线分配给 A、B、C 三相。若为反转向方案，则应改变分配次序。轴线位置的选取，应把轴线取在每相绕组槽号相位图中的空档或槽号稀疏处，使每段内槽号集中于中心点，以获得变后极有较大的分布系数。下面用实例说明。

例如，对于 $Q=36$，2/8 极的变极方案，2 极时为正规 60°相带，$q_1=6$，各相的槽号应为：

A 相绕组槽号：1，2，3，4，5，6，−19，−20，−21，−22，−23，−24。

B 相绕组槽号：13，14，15，16，17，18，−31，−32，−33，−34，−35，−36。

C 相绕组槽号：25，26，27，28，29，30，−7，−8，−9，−10，−11，−12。

变后极 $p_2=4$，$q_2=3/2$，其槽号相位图每行应为 $6N=$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

18格，相邻两槽位移2格，共有8行，如图3.8-5（a）所示。由于 $p_1 \neq 3k$，$p_2 \neq 3k$，且 $p_1+p_2=5 \neq 3k$，可判断同转向方案为对称方案，因此三根轴线应依次从左到右分配给A、B、C三相。轴线1的位置应选在A相槽号分布稀疏的位置，即选在3，4槽之间，如图3.8-5(b)所示，依次画出B相的轴线2和C相的轴线3，三根轴线互差120°。每根轴线将相绕组分为Ⅰ和Ⅱ两段，显然每段内的槽比较集中在中心点附近，因而其分布系数较大，$k_{dB}=0.731$。如果轴线选在槽比较集中处，如A相的1，－24槽中间，亦可得到对称方案，但相绕组分布系数将下降到 $k_{dB}=0.538$。

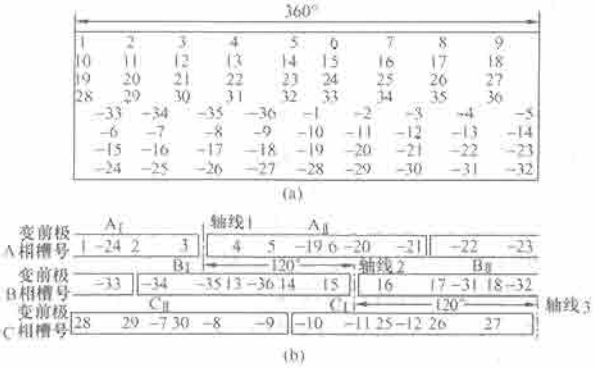


图3.8-5 $Q=36$，2/8极反向法变极

（a）变后极8极绕组槽号相位图；（b）变前极各相绕组槽号在变后极的相位分布图

反向法变极时，只是将各相绕组槽号分为Ⅰ和Ⅱ两段，其中 $A_Ⅰ$、$B_Ⅰ$、$C_Ⅰ$ 第一段内各线圈的电流方向在两种极数下不改变，而 $A_Ⅱ$、$B_Ⅱ$、$C_Ⅱ$ 第二段内各线圈的电流方向在变后极需反向，如图3.8-5(b)所示。变前极及变后极各相绕组的联结如图3.8-6所示。

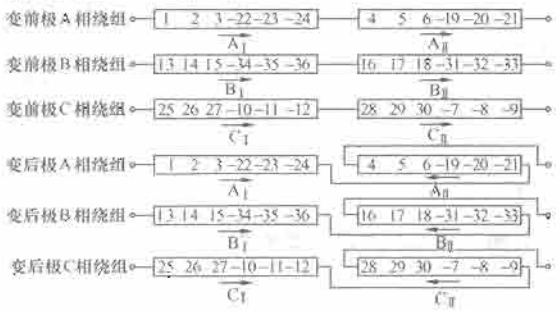


图3.8-6 $Q=36$，2/8极绕组联结

因为变前极和变后极绕组，均符合构成两条并联支路的条件，该变极方案绕组联结法，采用2Y/△，2Y/Y，2△/Y，2Y/2Y，Y/Y等联结法中哪一种都行，需根据电磁方案设计需要来选择。

对于常用的 $Q=36$，4/6极变极绕组，变前极4极为正规60°相带，各相槽号应为：

A相绕组槽号：1，2，3，－10，－11，－12，19，20，21，－28，－29，－30。

B相绕组槽号：7，8，9，－16，－17，－18，25，26，27，－34，－35，－36。

C相绕组槽号：13，14，15，－22，－23，－24，31，32，33，－4，－5，－6。

根据反向法变极的要求，画出变后极 $Q=36$，$p_2=3$，$q_2=2$ 的槽号相位图，变前极A、B、C各相绕组槽号在 p_2 对极的相位分布图，如图3.8-7(a)、图3.8-7(b)所示。由于 $p_1 \neq 3k$，$p_2=3k$，可判断同转向与反转向方案均可获得对称方案。由于各相绕组在变后极的相位分布是均匀分布，因此，轴线1可以选在任意位置，按同转向方案将轴线2，轴线3，从左至右依次分配给B、C相，将各相绕组槽号划分为Ⅰ和Ⅱ两段，把第Ⅱ段绕组内各线圈电流反向，即可得到变后极 p_2 对极，从图3.8-7(c)中看出是同转向的三相对称方案。按反转向方案亦可获得对称方案。

变后极各相绕组在180°相带内平均分布，分布系数较低，$k_{dd}=0.644$。如果变前极与变后极是倍极比的情况下，分布系数可得到比较高的值。

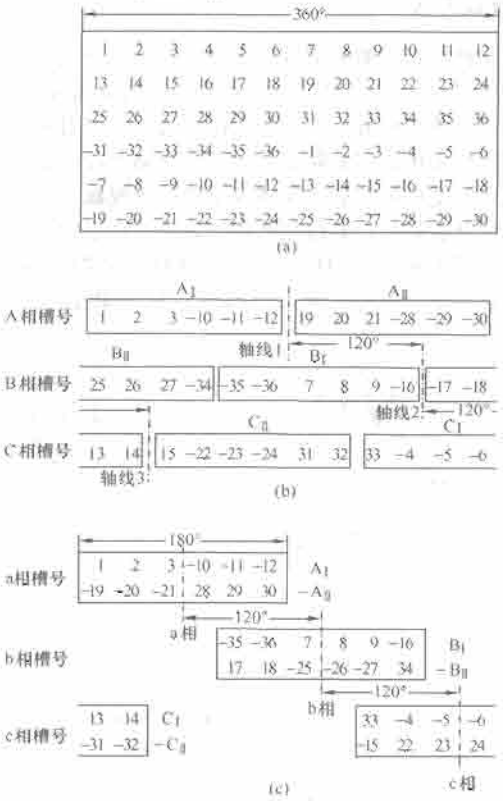


图3.8-7 $Q=36$，$p_1=2$，$p_2=3$ 反向法变极

（a）$Q=36$ $p_2=3$ 变后极槽号相位图；（b）变前极各相槽号在变后极相位图中的分布；（c）变后极各相槽号相位图

2.4 倍极比反向法变极绕组

下面分析 $Q=36$，2/4极，倍极比情况下的反向法变极绕组。当 $Q=36$，$p_1=1$，$q_1=6$ 正规60°相带时，各相绕组槽号前面已经给出，这里不再重复。

采用反向法变极，画出变后极 $p_2=2$，$q_2=3$ 的槽号相位图，变前极各相绕组槽号在变后极的相位分布图，如图3.8-8(a)、图3.8-8(b)所示。因 $p_1 \neq 3k$，$p_2 \neq 3k$，$p_1+p_2=3$ 是3的倍数，所以只有反转向方案对称。对于倍极比变极绕组，变后极 p_2 的极对数为变前极 p_1 的2倍，变前极 p_1 为60°相带在变后极中变为120°相带。轴线1选在A相绕组槽号的空档处，并自左至右将轴线2分配给C相，轴线3分配给B相，将每相绕组的第Ⅱ段反向，即可获得变后极a、b、c三相绕组。显然，此时得到一个正规120°相带的反转向对称方案，如图3.8-8（c）所示，变后极绕组分布系数 $k_{dd}=0.8312$，远高于180°相带的分布系数。变前极和变后极均可联结成两路并联，最常用的联结法是2Y/△，如图3.8-8(d)所示。

对于倍极比变极绕组常用反向法变极。因为其变前极为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

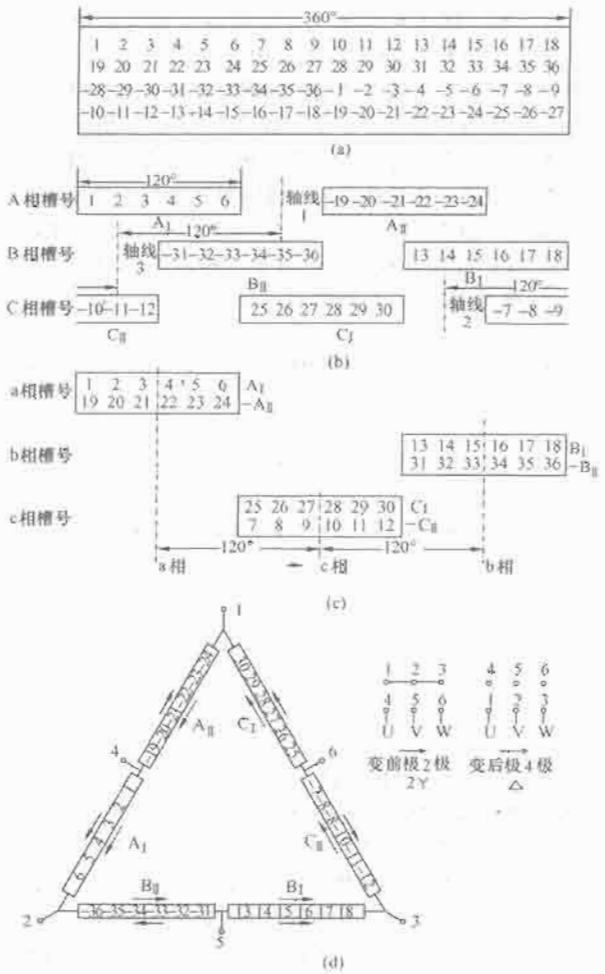


图 3.8-8　倍极比反向法变极

（a）$Q=36$，$p_2=2$ 变后极槽号相位图；（b）变前极各相槽号在变后极相位图中的分布；（c）变后极各相绕组槽号相位图；（d）变前极、变后极绕组的联结法（2Y/△）

正规 60°相带，变后极为正规 120°相带，绕组分布系数高、且谐波含量少，引出线只需 6 根。此种方案为反转向方案。

对于其他倍极比变极绕组，可根据电机功率大小等重新选择合适的槽数，但变极的原理方法和效果是一样的。

2.5　非正规接法绕组的反向法变极

反向法变极的变前极通常采用 60°相带正规接法绕组，因为它的分布系数高而谐波含量少。有时为了提高变后极绕组的分布系数，变前极也常采用非正规接法。为了使变前极绕组的分布系数不致降低太多，在选取变前极每相槽号时，其相位分布范围应不超过 120°。具体选取步骤如下：

1）在变前极槽号相位图中，按 120°等分三个区域 A、B 和 C，每个区域内包括 $2Q/3$ 个槽号。

2）在变后极槽号相位图中，确定变前极 A、B、C 三个区域槽号在变后极中的相位分布。

3）用三根互差 120°轴线，每个区域一根，将 A、B、C 三个区域划分为两段，每段为 180°。

4）为使变后极绕组分布系数较高，在每段内选取槽号时，尽量选取每段中心点附近槽号。另为保证变后极绕组三相对称和引出线只有 6 根，六个方框内选用槽号的相位分布必须一致。每个槽号只能选用一次（包括正、负）。

5）被选用的三相槽号需返回到变前极，检验变前极三相绕组是否对称，是否能构成并联联结。下面用实例来说明。

图 3.8-9 为 $Q=36$，4/6 极，非正规接法的反向法变极绕组方案。若变前极采用正规 60°相带绕组，则变后极分布系数较低，如图 3.8-7 所示的方案 $k_{dp}=0.644$。为了提高变后极分布系数，现把变前极改用非正规接法绕组。将变前极槽号相位图，等分为 A、B、C 三个区域，并分别画出其在变后极中的相位分布，如图 3.8-9(a)、图 3.8-9(d)所示。因为 $p_1\neq 3k$，$p_2=3k$，故同时存在同转向和反转向方案两种对称方案，现采用反转向方案，即 3 根互差 120°的轴线自左至右分配给 A、C、B 三相，将轴线左、右划分为两段，各 180°范围。在每段内选取槽号，首先选取每段中心附近槽号，如图 3.8-9(d)所示带波浪线的 4 个，即 A 相第一段内，2、3、−32、−33 和第二段内 20、21、−14、−15，相应地选取其他 4 个段内的 4 个槽，6 个段内共 24 个槽。并消除与这 24 个槽号相同，符号相反的槽号。进一步再选靠近中心的两个槽号，在槽号上画上圆圈，相应地选取其他 4 个段内的 2 个槽，使变后极为三相对称方案，且 6 个段内槽号的分布完全相同。最后再返回到变前极的槽号相位图，检验三相绕组在变前极的相位分布，是否构成三相对称方案，如图 3.8-9(b)所示，显然为三相对称绕组。从图 3.8-9(b)和图 3.8-9(d)可计算出分布系数，4 极时 $k_{dp}=0.831$，6 极时 $k_{dp}=0.88$。以上方案为反转向方案，同理，也可得到同转向方案，但谐波情况要差一些，实用上常取反转向方案。

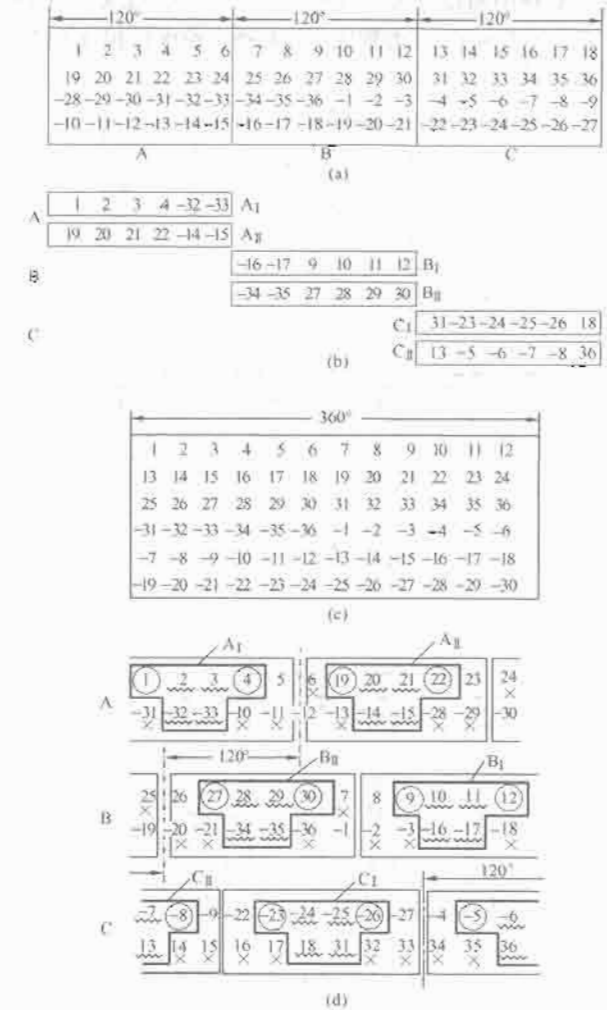


图 3.8-9　非正规反向法变极

（a）$Q=36$，$p_1=2$ 变前极槽号相位图；（b）变前极各相绕组槽号相位图；（c）$Q=36$，$p_2=3$ 变后极槽号相位图；（d）变后极各相绕组槽号相位图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

从上例分析可见，变前极采用非正规接法绕组使变前极绕组分布系数有所降低，但明显提高了变后极的分布系数，使两者分布系数比较接近。

3 换相法变极绕组

与反向法变极绕组不同，在实现换相变极法时，打破了变前极三相绕组的相属界限，把三相绕组线圈的槽号重新分配给变后极的三相绕组。换相变极法前面的几个步骤和反向法一样，不同的是换相法的各轴线将变前极每一相绕组的槽号同时划分为若干段(如三段，六段等)，然后打破变前极三相的界限，重新组成变后极三相绕组。下面介绍几种常用的换相变极法。

3.1 变前极和变后极都是60°相带绕组

60°相带绕组由于分布系数高、谐波含量少和接线简单，常用在三相电机中。变极时需用六根互差60°的轴线把变前极每相绕组划分为六段，然后重新分配给变后极的三相，可得到60°相带的变后极绕组。用反向法不可能做到变前极和变后极都是60°相带绕组，但用换相法变极能做到，只是引出线多、接线复杂。下面举例说明。

例如，$Q=36$，4/6极，用换相变极法构成变前极和变后极都是60°相带的绕组。4极60°相带三相绕组的槽号分配前面已给出。变后极6极的槽号相位图及变前极三相绕组槽号在变后极的相位分布，如图3.8-10(a)、图3.8-10(b)所示。图中六根互差60°的轴线，同时把变前极每相绕组槽号划分为六段。

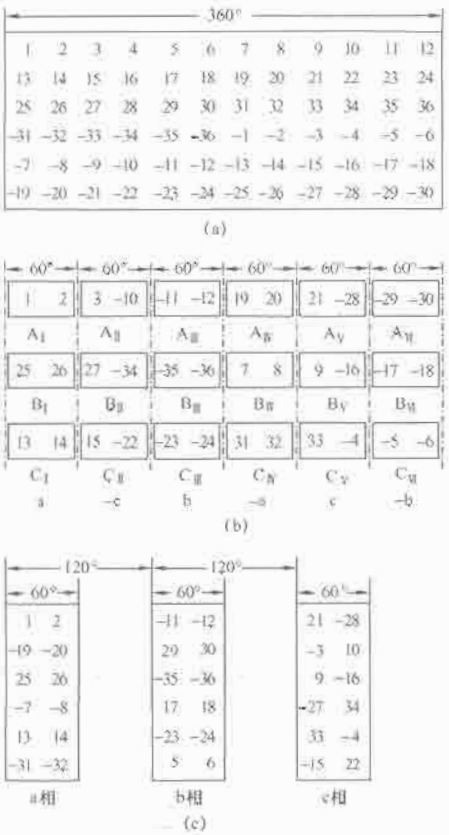


图3.8-10 $Q=36$，4/6极60°~60°相带换相法变极
(a) 变后极6极槽号相位图；(b) 每相6段划分法；
(c) 变后极6极三相槽号相位图

把变前极三相绕组的Ⅰ、Ⅲ、Ⅴ段分别分配给变后极的a、b、c相，把Ⅳ、Ⅵ、Ⅱ段位移180°后分别分配给变后极的a、b、c相。图3.8-10(c)为变后极的三相绕组槽号相位图，每相绕组为60°相带，构成三相对称绕组。

换相变极法，打破了变前极线圈原相属后重新组合，如变后极a相绕组，它包含了变前极A、B、C相绕组中的第Ⅰ段和第Ⅳ段。因为变前极和变后极绕组都是60°相带，故分布系数都很高，这是换相法变极绕组的优点。这种变极法的缺点是，三相绕组共分为18段，采用Y/Y联结法也需要33根引出线，接线太复杂。但对于一些特殊极数比，如倍极数比和极数比为1/3的情况，分段数和引出线会减少一些。

变前极和变后极各相绕组六段的联结图如图3.8-11所示。

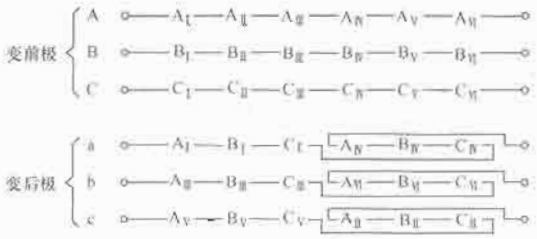


图3.8-11 绕组6段联结图

对于$Q=36$，4/2极，这是倍极数比的情况。变后极2极的槽号相位图，及4极各相绕组在变后极的相位分布，如图3.8-12(a)、图3.8-12(b)所示，图中六根轴线互差60°。4极变2极时，变前极的60°相带在变后极中仅占30°相带，变前极每相绕组仅有四段，因而简化了接线。变前极和变后极各相的联结图与上例相同，只是倍极数比时每相绕组减少了两段，三相引出线共减少12根，采用Y/Y联结法引出线为21根，如采用2△/2△引出线仅为12根。

3.2 变前极和变后极绕组都是120°相带绕组

变前极绕组采用正规120°相带绕组时，三相绕组的槽号都是正槽号，用三根互差120°的轴线把变后极槽号相位图中的正槽号等分为三部分，然后重新分配给三相，便得到正规120°相带的变后极绕组。下面用实例说明。

例如，$Q=36$，4/6极变极绕组，4极绕组为正规120°相带时，其三相绕组的槽号为：

变前极A相绕组：1，2，3，4，5，6，19，20，21，22，23，24。

变前极B相绕组：7，8，9，10，11，12，25，26，27，28，29，30。

变前极C相绕组：13，14，15，16，17，18，31，32，33，34，35，36。

如图3.8-13(a)、图3.8-13(b)所示，三根互差120°的轴线，把变前极每相槽号划分为三段：$A_Ⅰ$、$A_Ⅱ$、$A_Ⅲ$；$B_Ⅰ$、$B_Ⅱ$、$B_Ⅲ$；$C_Ⅰ$、$C_Ⅱ$、$C_Ⅲ$。将$A_Ⅰ$、$B_Ⅰ$、$C_Ⅰ$三段分配给变后极a相；$A_Ⅱ$、$B_Ⅱ$、$C_Ⅱ$三段分配给变后极b相；$A_Ⅲ$、$B_Ⅲ$、$C_Ⅲ$三段分配给变后极c相。便得到图3.8-13(c)中的正规120°相带的变后极三相绕组。

变前极和变后极均为120°相带的换相法变极绕组，绕组分布系数较高，引出线少，若用Y/Y联结法则引出线为15根，用△/△联结法引出线为12根，如图3.8-14所示。变极前后的绕组均为正规120°相带，所以谐波含量少。综合以上几方面因数考虑，这种是比较实用的换相法变极绕组。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

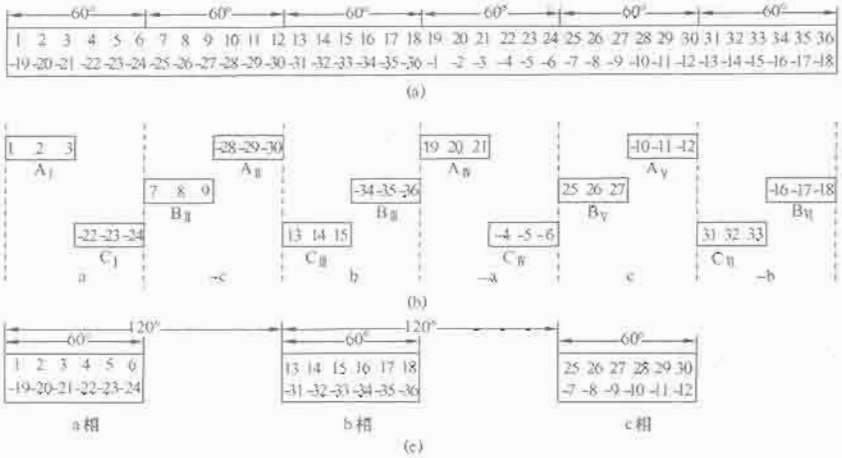


图 3.8-12　Q=36，4/2 极换相法变极

(a) 变后极 2 极槽号相位图；(b) 变前极三相绕组的分段划分；

(c) 变后极 2 极三相绕组槽号相位图

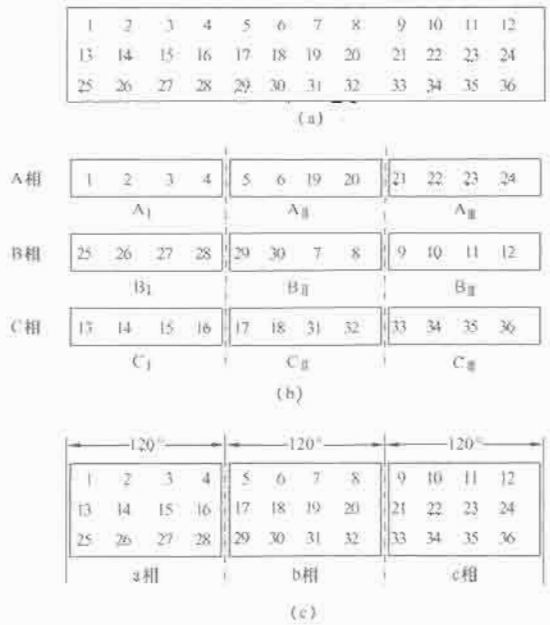


图 3.8-13　Q=36 4/6 极，120°～120°相带换相法变极

(a) 变后极槽号相位图；(b) 变前极各相绕组在变后极中的相位分布及分段划分；(c) 变后极三相绕组槽号相位分布

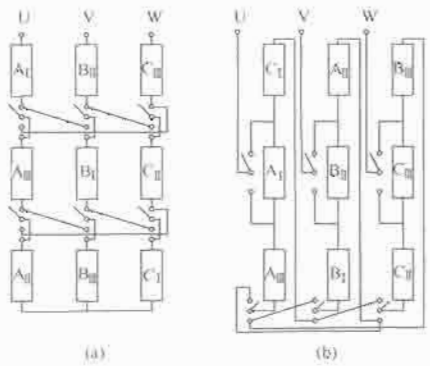


图 3.8-14　120°相带换相联结法

(a) Y/Y 联结法，双向开关向上为变前极，向下为变后极；

(b) △/△联结法，双向开关向上为变前极，向下为变后极

3.3　60°相带变 90°相带换相变极法

这种换相变极法的最大优点是引出线只需 6 根，且绕组分布系数较高；缺点是变前极或变后极要丢弃部分线圈。当变前极和变后极的每极每相槽数分别是 $q_1=N_1/D_1$，$q_2=N_2/D_2$ 时，实现这种换相法变极，需满足以下的条件

$$\left.\begin{aligned} &D_1 \neq 3k,\\ &D_2 \neq 3k,(k=1,2,\cdots)\\ &N_2 = \text{偶数(或 4 的倍数)}\\ &\frac{p_2}{p_1}\frac{D_1}{D_2}=\frac{3}{2}\left(\text{或}\frac{3}{4}\right) \end{aligned}\right\} \tag{3.8-3}$$

式中，括号内“3/4”与 N_2=4 的倍数相对应。下面用实例来说明。

例如，Q=36，4/6 极变极绕组，其中

$$q_1=\frac{36}{4\times3}=3;\ q_2=\frac{36}{6\times3}=2;\ \text{且}\ \frac{p_2}{p_1}\frac{D_1}{D_2}=\frac{3}{2}$$

满足式（3.8-3）的条件。4 极为 60°相带绕组，分配给 A、B、C 三相绕组的槽号如前。如图 3.8-15(a)、图 3.8-15(b)所示，6 根轴线，分别按 90°、30°、90°、30°、90°、30°分布，将变前极各相绕组划分成Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ六段。构成三相变极绕组有两种联结方法，第一种是 4Y/3Y 联结，第二种是 3Y/3Y+Y 联结，分述如下。

3.3.1　4Y/3Y 联结法

4Y/3Y 联结法是变前极绕组的联结为 4Y，全部线圈均利用，而变后极绕组是 3Y 联结，丢弃了 1/4 的线圈，只有 6 根引出线，如图 3.8-16(a)所示。这里要注意变前极绕组线圈的联结是按图 3.8-15(b)、图 3.8-15(e)所示来构成四条并联支路的，其中每相的第Ⅰ、Ⅲ、Ⅴ段构成三条并联支路，第Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ三小段共构成一条支路，共四条并联支路。而变后极绕组为 3Y 联结，其中每相的Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ三小段上无外加电压(但带中性点电位)，因而有 1/4 的线圈被丢弃，利用率降低。

3.3.2　3Y/3Y+Y 联结法

3Y/3Y+Y 联结法是变前极绕组的联结为 3Y 联结，丢弃 1/4 的线圈，而变后极绕组为 3Y+Y 联结，全部线圈均使用，只有 6 根引出线，如图 3.8-16(b)所示。变前极绕组为每相的第Ⅰ、Ⅲ、Ⅴ段构成三条并联支路。变后极的 a 相则是变前极 A、B、C 三相的第Ⅰ段构成三条并联支路，而三相的第Ⅳ段联结后再与 3Y 串联，如图 3.8-15(c)与图 3.8-16(b)所示，第Ⅳ段的电流方向已经反向，其中的槽号不需改变正、负号。另方面单 Y 中的电流是 3Y 中每条支路的 3

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

倍，因而单Y线圈中每匝的导线截面积应为其他线圈每匝导线截面积的三倍，而线圈的匝数则应减到其他线圈匝数的1/3。



图 3.8-15 60°～90°相带换相法变极

(a) Q=36，6极槽号相位图；(b) 变前极三相绕组在变后极的相位分布图；(c) 变后极3Y+Y联结时的三相绕组槽号相位图；(d) Q=36，4极槽号相位图；(e) 变前极4Y联结时的三相绕组槽号相位图

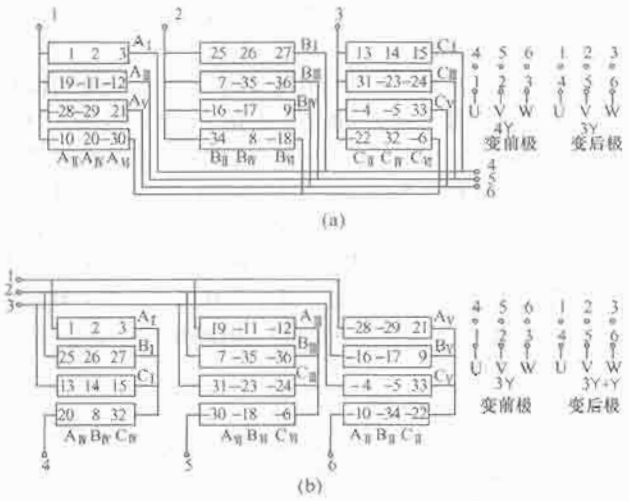


图 3.8-16 60°～90°换相联结法

(a) 4Y/3Y联结法；(b) 3Y/3Y+Y联结法

4 三速及四速变极绕组

将本章2、3节用于单绕组双速变极方法加以推广，便可实现三种或四种极数的单绕组或双绕组变极。设计这种绕组时，选择一种极数作为变前极，而把其余极数作为变后极。此时，变前极与每个变后极形成一组，可采用反向法或换相法构成变极绕组。实用上三速及四速变极绕组也常采用两套绕组，每套绕组采用一种极数绕组或两种极数的变极绕组，视电磁设计需要而定。

由于一套绕组变换极数太多时，接线过于复杂，性能也难保证，实际意义不大，因此，本节只限于分析三种和四种极数的变极绕组。

4.1 三速变极绕组

4.1.1 2/4/8极数比的三速变极绕组

三速变极绕组可以分解为两种双速变极绕组来处理，如2/4/8极数比的三速变极绕组可以分解为4/8极和4/2极两种双速变极绕组。

例如，Q=36，2/4/8极，三种极数的变极绕组。取4极为变前极，绕组为正规60°相带，采用反向法获得8极反转向绕组，是正规120°相带，如图3.8-17(a)、(b)所示。4/2极采用60°变60°相带的换相法，如图3.8-17(c)所示，每相绕组均为正规60°相带，为同转向方案。最后得到60°/60°/120°相带三种极数比的三速变极绕组。

2/4/8极三种极数绕组如图3.8-17(d)所示，联结成2△/2△/2Y联结时，只需12根引出线。由于三种极数下的绕组都是正规60°相带或正规120°相带，因此，绕组分布系数高，且谐波含量少，是很实用的三速变极绕组。

4.1.2 4/6/8极数比的三速变极绕组

在4/6/8极的三种极数变极中，分别用反向法构成4/6极和4/8极绕组，下面用实例说明。

对于Q=36，4/6/8三种极数的变极绕组。取4极为变前极，绕组采用60°相带。反向法变极时，同时存在同转向和反转向的两种对称方案。对4/8极时，只有反转向方案是对称方案。为了简化接线，要做到三种极数下三相绕组的槽号分段应一致。

用反向法进行4/6极变极。采用同转向方案，变后极6极绕组为180°相带。4极的分段应与6极一致，如图3.8-18(a)、(b)所示，也应和后面的8极一致。

对4/8极用反向法进行变极，获得如图3.8-18(c)所示的4/8极变极绕组，是正规的120°相带。

4/6/8极下每相绕组均可构成两路并联联结，由此可得2Y/2Y/2Y联结法，如图3.8-18(d)所示，电机引出线只有九根。

4极变6极时采用反转向方案亦可获得对称方案，只是构成各相绕组每段的槽号与同转向的不一致，6极谐波也不一致。

上述的4/6/8极反向法变极绕组中6极绕组的分布系数较低，且谐波含量多。如果对6极绕组性能要求比较高，实用上也可采用两套绕组的方案，即4/8极为一套变极绕组，6极单独采用一套正规60°相带绕组。

4.1.3 2/4/6极数比的三速变极绕组

在2/4/6极的三种极数变极中，用通常换相法得到的分段数比较多，接线也比较复杂。实用中常以6极为变前极，将全部正槽号分为九段，构成8极120°相带三相对称绕组。然后，用这九段绕组，通过换相法分别获得2极和4极的变极绕组。为了得到较高的分布系数和减少引出线数，常采用△-Y形的混合联结法。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

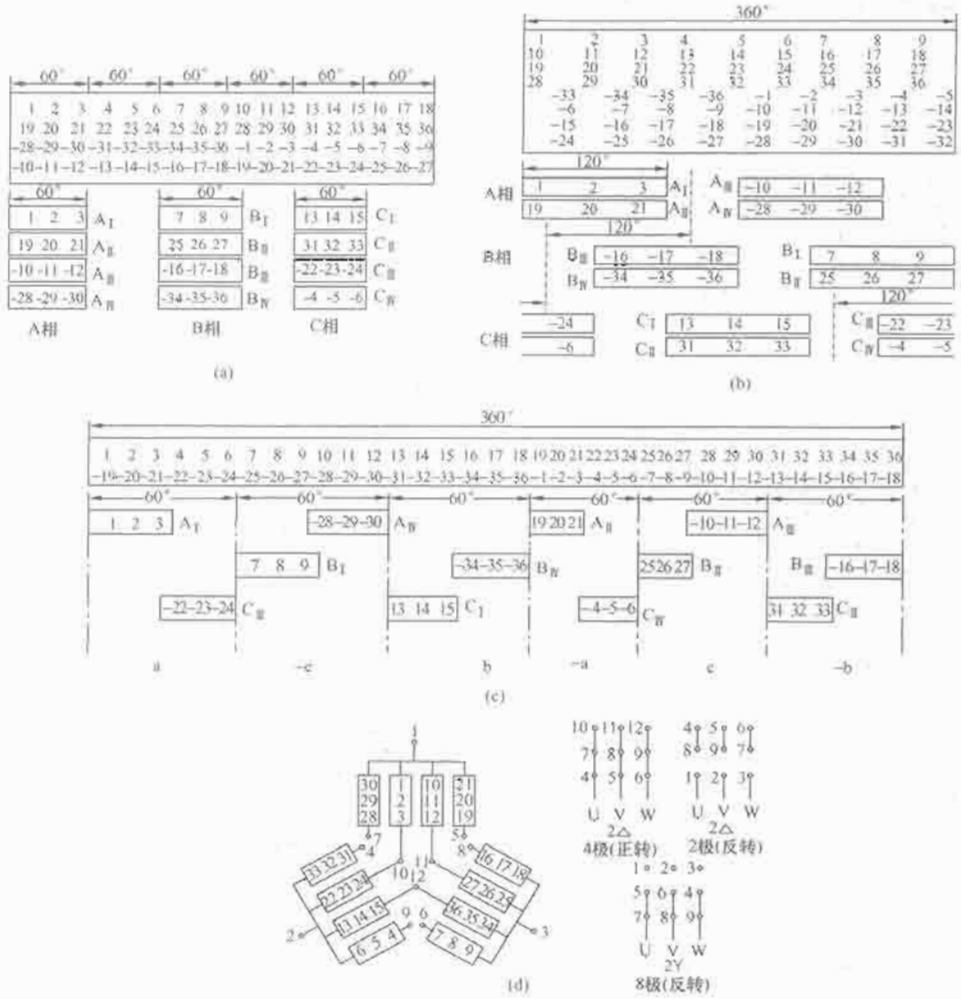


图 3.8-17　Q=36，2/4/8 极 60°/60°/120°相带变极绕组
(a)60°相带 4 极三相绕组；(b)反向法 4 极变 8 极方案；
(c)换相法 4 极变 2 极变极方案；(d)2△/2△/2Y 联结图

△-Y 混合联结法可以提高分布系数和削弱或消除五次、七次等谐波，△和 Y 联结法有人串联联结和⧋并联联结两种。其中△和 Y 部分的三相绕组分别构成三相对称绕组。根据交流电路理论和交流电机绕组理论，为使△和 Y 两部分绕组产生的基波磁动势（幅值恒定的旋转磁动势）在空间上相位相同直接相加，必须满足△和 Y 部分绕组中的电流在时间上有 30°的相位差，△和 Y 部分绕组在空间上有相应的 30°相位差。当串联联结人时，Y 部分绕组的电流恒为△部分绕组电流的$\sqrt{3}$倍。若用并联联结⧋，△部分和 Y 部分的电流如何分配，决定于各自的电动势和阻抗，为了避免产生环流，△部分和 Y 部分的感应电动势尚须配合得当。△-Y 混合联结如图 3.8-19(a)、(b)所示。

例如，Q=36，2/4/6 极三种极数的变极绕组。6 极绕组按 120°相带划分为九段，如图 3.8-20(a)所示。2 极仍保留 6 极绕组的九段分段法，如图 3.8-20(b)所示。选择六段分别分配给 2 极 A、B、C 相绕组的△部分，$A_\triangle$、$B_\triangle$、$C_\triangle$ 互差 120°，构成三相对称绕组。再选择三段分别分配给 2 极 A、B、C 相绕组的 Y 部分，A_Y、B_Y、C_Y 亦互差 120°，构成三相对称绕组。Y 部分的磁动势合成轴线滞后△部分轴线 30°。4 极亦保留 6 极绕组的分段法。构成 4 极△部分和 Y 部分的方法与 2 极时一样，如图 3.8-20(c)所示。三种极数均为同转向方案。

三种极数下分布系数均较高，6 极为正规 120°相带，其分布系数 k_{d6}=0.8365。2 极时由于△和 Y 部分绕组分布的相带不到 60°，分布系数很高 k_{d2Y}=0.9811，$k_{d2\triangle}$=0.9662。4 极的绕组分布系数分别是 $k_{d4\triangle}$=0.9114，k_{d4Y}=0.9254。这是采用△-Y 混合联结的优点，引出线总共只有 13 根。但并联的△-Y 联结法，△部分的线电动势即为相电动势，而 Y 部分线电动势为$\sqrt{3}$倍相电动势，它们在电路上是并联关系，因而要求它们的线电动势相等。因为短距系数相同，所以它们的有效匝数的关系应符合

$$N_\triangle k_{d\triangle}=\sqrt{3}N_Y k_{dY} \tag{3.8-4}$$

式中，$N_\triangle$、N_Y 分别为△部分和 Y 部分的一相串联匝数；$k_{d\triangle}$、k_{dY} 分别为△部分和 Y 部分的相绕组分布系数。

根据以上关系，为了满足式（3.8-4）的要求，在 2、4 极绕组中△部分均采用了两段绕组串联，而 Y 部分仅采用一段绕组，当每个线圈的匝数相同时，计算结果表明仍有少许不对称，会产生一些环流，但实用效果还可以。如按式（3.8-4）要求，对△部分和 Y 部分的线圈选取不同匝数，一方面制造复杂，另一方面对于 6 极须采用三路并联，要求每段的串联匝数相等，因此，实用上仍采用每个线圈的匝数相同。

2/4/6 极三种极数下的联结法为⧋/⧋/3Y，如图 3.8-20(d)、图 3.8-20(e)所示，引出线为 13 根，三种极数下均为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

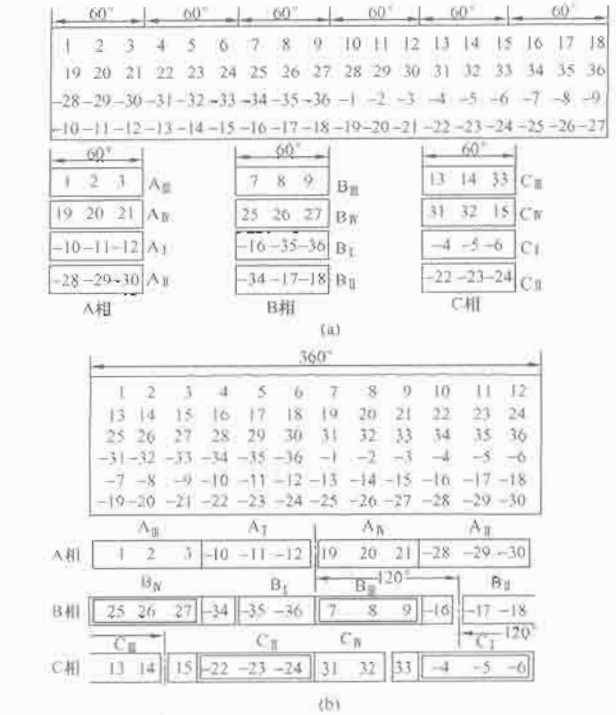


图 3.8-18 Q=36，4/6/8 极变极绕组

(a) 4 极 60°相带三相绕组；(b) 反向法 4 极变 6 极变极方案；(c) 反向法 4 极变 8 极变极方案；(d) 4/6/8 极 2Y/2Y/2Y 接线图

同转向方案。

4.2 四速变极绕组

对于 2/4/6/8 极数比的四速电机，如采用一套绕组，为了获得较高的分布系数，引出线数又要尽可能少，必须减少整个绕组的分段数。类似于图 3.8-20 将全部槽号分为九段，

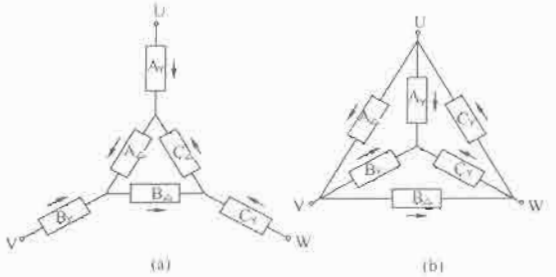


图 3.8-19 △-Y 混合联结法

(a) △-Y 串联联结；(b) △-Y 并联联结

再通过换相法来重新组合变后极绕组。

例如设计 Q=36，2/4/6/8 极四种极数的变极绕组。以 6 极为变前极，按 120°相带来划分三相绕组，整个绕组被划分为九段，如图 3.8-21(a)所示，变后极仍按被划分的九段绕组来组成。变后极 2 极绕组每相的槽号分布在 80°相带内，其分布系数达到 k_{d2}=0.9416，如图 3.8-21(b)所示。变后极 4 极绕组每相的槽号分布在 120°相带内，其分布系数 k_{d4}=0.8882，如图 3.8-21(c)所示。变后极 8 极绕组每相的槽号分布在 180°相带内，其分布系数 k_{d8}=0.6909，如图 3.8-21(d)所示。2/4/6/8 极四速变极绕组总共分为九段绕组，各段接线和三相联结如图 3.8-21(e)所示，2/4/6/8 极四种极数皆为三角接法，即△/△/△/△联结。其中第Ⅰ和第Ⅶ段可固定联结在一起，其引出线为 17 根。

对于其他极比的四速电机，常采用两套绕组，每套本身又是两速或三速变极绕组。当极数比为 4/6/8/10 的变极绕组，常采用两套绕组变极方案，其中一套绕组极数比为 4/6/8，采用图 3.8-18 的变极方案，10 极单独用一套 60°相带绕组。而对于极数比为 4/6/8/12 的变极绕组，常采用 4/8 极和 6/12 极两套倍极数比的变极绕组。每套倍极数比的绕组只有 6 根引出线，总共为 12 根引出线，谐波含量少，性能好。

5 单绕组多速三相感应电动机设计特点

多速三相感应电动机电磁设计与单速的设计方法基本相同，只是对每种极数都需进行电磁方案设计。变极前后两种极数下的电磁转矩、功率存在一定的关系，另外变后极绕组磁动势的谐波含量较正规接法的绕组要多。

5.1 电磁转矩比和电磁功率比

以下标 1、2 分别表示变前极和变后极的有关各量，在忽略两种极对数下运行时转子功率因数的差别，以及认为运行温度接近的条件下，可近似得到两种极对数下的电磁转矩比即为气隙磁通密度比

$$\frac{T_2}{T_1}\approx\frac{B_{\delta 2}}{B_{\delta 1}}=\frac{p_2E_2N_1K_{dp1}}{p_1E_1N_2K_{dp2}} \tag{3.8-5}$$

式中，T 为电磁转矩；B_δ 为气隙磁通密度；p 为极对数；E 为相电动势；N 为相绕组串联匝数；K_{dp} 为相绕组系数。

式(3.8-5)中，极对数 p 的比值为已知，相电动势 E 的值取决于绕组是 Y 联结还是△联结，匝数比值取决于绕组在两种极数时是串联还是并联。

两种极对数时的功率比为

$$\frac{P_2}{P_1}=\frac{T_2n_2}{T_1n_1} \tag{3.8-6}$$

式中未考虑多极数时通风条件差及功率因数和效率值下降对功率的影响。如考虑此影响，多极数时功率会适当降低，须

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

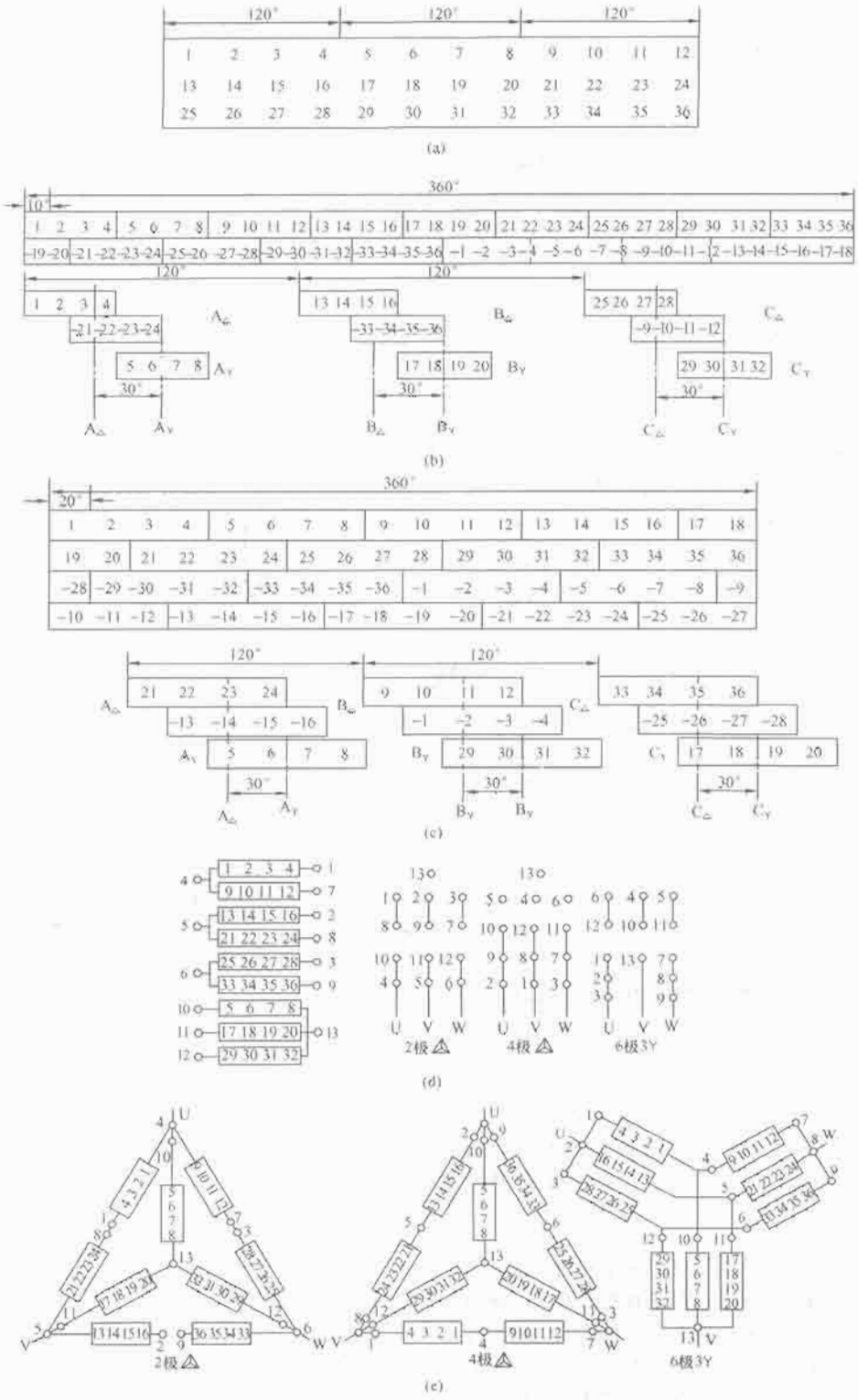


图 3.8-20　Q=36，2/4/6 极变极方案

(a) 120°相带 6 极三相绕组；(b) 换相法 6 极变 2 极方案；(c) 换相法 6 极变 4 极方案；
(d) 2/4/6 极△/△/3Y 接线图；(e) 2/4/6 极△/△/3Y 接线图

乘以功率折扣系数 K。估算时可取系数 K 为 0.7～0.9，近极数比取较大值，远极数比取较小值。

以常用的 2Y/△联结法为例，在略去绕组系数影响时为

2/4 极　$T_2/T_1 \approx 1.732$　$P_2/P_1 = 0.866$

4/6 极　$T_2/T_1 \approx 1.299$　$P_2/P_1 = 0.866$

6/8 极　$T_2/T_1 \approx 1.155$　$P_2/P_1 = 0.866$

即电磁转矩比随着两种极数比的接近而逐渐减少，电磁功率比只决定于联结法而与极数比无关。

5.2　绕组磁动势的分析

单绕组变极绕组产生磁动势的谐波含量一般较多，而谐波磁场对电动机的性能会产生影响。主要表现在影响起动性能，产生振动噪声和增加附加损耗等方面。因此，对变极绕组应进行绕组磁动势的分析，以优选变极绕组。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

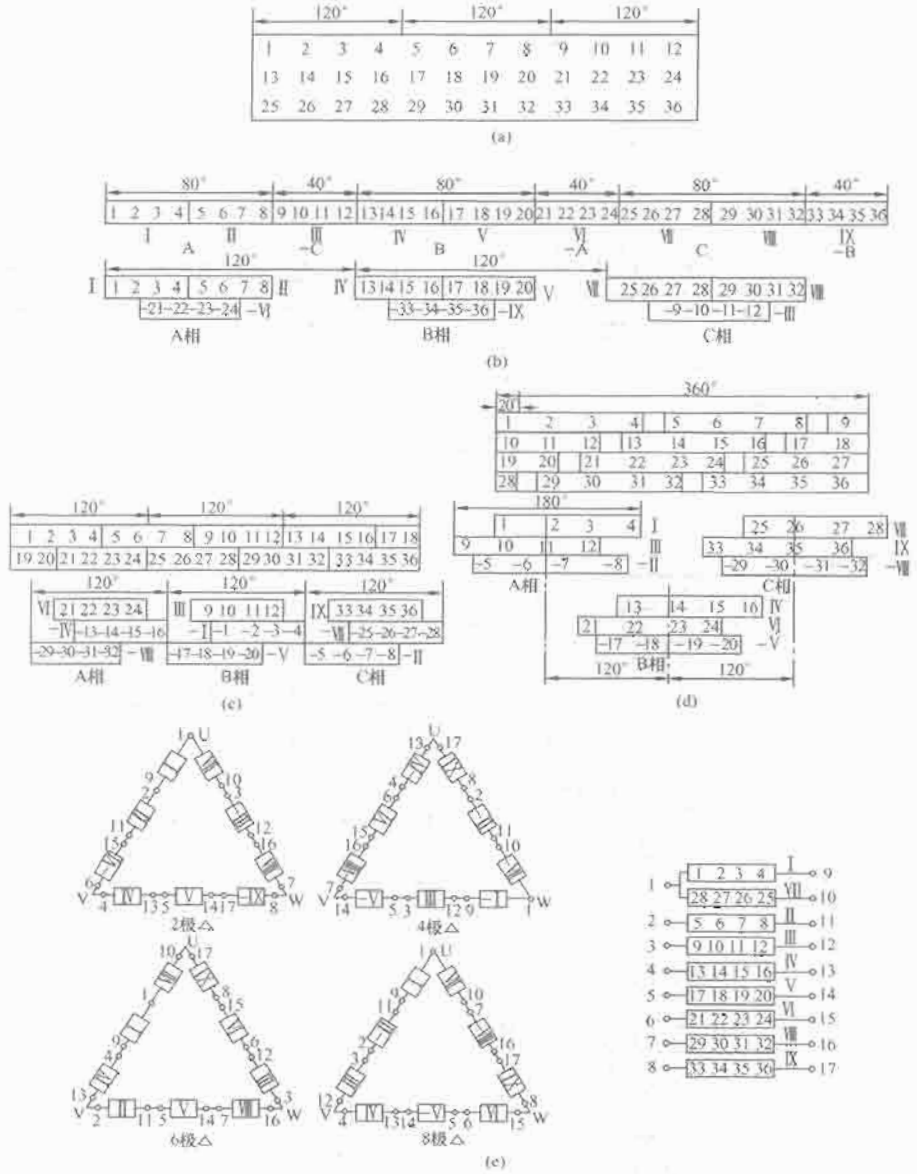


图 3.8-21 $Q=36$，2/4/6/8 极变极绕组

(a)120°相带 6 极三相绕组；(b)2 极绕组变极方案；(c)4 极绕组变极方案；

(d)8 极绕组变极方案；(e)2/4/6/8 接线图

5.2.1 分布系数的通用计算法

分布系数是相绕组所有线圈磁动势的矢量和与算术和之比。由于变极绕组线圈分布不规律，很难找出简便的、通用的解析计算公式，这里给出一种计算分布系数普遍适用的方法。即根据分布系数的定义求出相绕组所有线圈磁动势的矢量和，计算其大小和相位，其大小与算术和之比即为相绕组的分布系数。

对 ν 对极谐波的槽矢量星形图来说，各线圈安匝数相同时，取各矢量长度为 1，第 i 槽矢量可用函数 $e^{-j\nu\alpha}$ 表示，其中槽距角 $\alpha=2\pi/Q$ 弧度，而对负槽号 i 的矢量应表示为 $-e^{-j|i|\nu\alpha}$。

现设 A 相的 $Q/3$ 个槽的槽号(包括正、负号)为 M_1，M_2，…，M_i，…，$M_{Q/3}$，则 A 相磁动势合成矢量的复数表达式为

$$\overline{F}_{A\nu}=x_{A\nu}-jy_{A\nu} \tag{3.8-7}$$

式中

$$\left.\begin{aligned} x_{A\nu}&=\sum_{i=1}^{Q/3}\frac{M_i}{|M_i|}\cos(M_i\nu\alpha)\\ y_{A\nu}&=\sum_{i=1}^{Q/3}\sin(M_i\nu\alpha)\end{aligned}\right\} \tag{3.8-8}$$

可求出 A 相的分布系数为

$$k_{dA\nu}=\frac{\sqrt{x_{A\nu}^2+y_{A\nu}^2}}{Q/3} \tag{3.8-9}$$

A 相相位角为

$$\varphi_{A\nu}=\arctan\left(\frac{y_{A\nu}}{x_{A\nu}}\right)-\left(\frac{x_{A\nu}}{|x_{A\nu}|}-1\right)\frac{\pi}{2} \tag{3.8-10}$$

同理，用 B 相或 C 相的 $Q/3$ 个槽的槽号代替 A 相的槽号即可求出 B 相或 C 相的分布系数 $k_{dB\nu}$ 或 $k_{dC\nu}$，相位角 $\varphi_{B\nu}$ 或 $\varphi_{C\nu}$。用计算机编程很容易计算出 ν 对极的分布系数和相位角，当基波极对数为 p，则 $\nu=p$ 时为基波的分布系数和相位角。

5.2.2 三相绕组合成磁动势的谐波分析

当 ν 对极的三相分布系数相等，且三相相位角互差

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

120°，通过绕组的电流是对称三相电流时，三相合成磁动势为一个 ν 对极的圆形旋转磁动势。ν 对极磁动势用基波磁动势的百分数表示的值为

$$F_\nu(\%)=\frac{k_{d\nu}k_{p\nu}}{k_{dp}k_{pp}}\frac{p}{\nu}\times 100 \qquad (3.8\text{-}11)$$

式中，$k_{p\nu}$、k_{pp} 分别为 ν 对极和基波的短距系数；$k_{d\nu}$、k_{dp} 为 ν 对极和基波的分布系数。

ν 对极磁动势的旋转方向决定于按 $\varphi_{A\nu}$、$\varphi_{B\nu}$、$\varphi_{C\nu}$ 求得的三相磁动势在空间上的相序，其相序与基波相同的为同转向，相反的为反转向。在变极方案中应选取谐波含量较少和谐波幅值较小的方案。

当 ν 对极的三相分布系数和相位角不符合上述条件时，则三相合成磁动势可能同时存在同转向和反转向的旋转磁动势。

5.3　轭部磁路及损耗计算

多速电机在高速运行时的轭部磁通密度允许比普通单速电机的高一些，以便获得各种速度下合理的气隙磁通密度比和功率输出。当定子轭部磁通密度 $B_{j1}>1.8$T 时，部分磁通密度将从机壳中通过(对于定子铁心与机壳直接紧密配合的电机)，使轭部实际磁通密度较按轭部面积计算出的理论值低，因此轭部磁位降需按下式修正

$$F'_{j1}=C_{11}F_{j1} \qquad (3.8\text{-}12)$$

式中，F_{j1} 为未修正前计算的轭部磁位降；C_{11} 为高饱和校正系数，可从表 3.8-1 查出。

表 3.8-1　　高饱和校正系数

B_{j1} (T)	1.8	1.85	1.9	1.95	2.0	2.05	2.1	2.15	2.2	2.3	2.4
C_{11}	0.82	0.79	0.76	0.74	0.71	0.68	0.65	0.62	0.58	0.53	0.50

因一部分轭部磁通通过机壳也产生损耗，轭部损耗计算也需修正。考虑因加工使损耗增加的系数 k 时，应高于一般的数值，于是轭部铁耗(包括基本铁耗和附加铁损耗)

$$P_{Fej}=kp_{Fej}M_j \qquad (3.8\text{-}13)$$

式中，p_{Fej} 为未考虑因加工使损耗增加的系数 k 时，轭部单位质量内损耗；M_j 为轭的质量；k 为因加工使损耗增加的系数，其中

当 $1.8\leqslant B_{j1}<1.9$T 时，$k=3$；

当 $1.9\leqslant B_{j1}<2.0$T 时，$k=3.5$；

当 $2.0\leqslant B_{j1}<2.2$T 时，$k=4$。

5.4　参数计算

5.4.1　槽漏抗计算

计算非正规 60°相带和 120°相带绕组的槽比漏磁导的节距漏抗系数 K_U 和 K_L，应根据每相各槽上下层线圈边中电流的实际相位差所对应 K_U、K_L 值的平均值进行计算，见表 3.8-2。

表 3.8-2　　槽比漏磁导节距漏抗系数 K_U 和 K_L

相位差	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
K_U	1	0.933	0.75	0.5	0.25	0.067	0
K_L	1	0.948	0.81	0.625	0.437	0.3	0.25

$$K_{U\varphi v}=\frac{nK_{U0}+mK_{U30}+\cdots}{n+m+\cdots} \qquad (3.8\text{-}14)$$

$$K_{L\varphi v}=\frac{nK_{L0}+mK_{L30}+\cdots}{n+m+\cdots} \qquad (3.8\text{-}15)$$

式中，n，m，…为每相中槽内上下层线圈边电流相位差分别为 0°，30°，…的槽的个数。

5.4.2　谐波漏抗计算

正规 60°相带和 120°相带绕组的谐波漏抗，一般电机设计中电磁计算公式均有曲线可供查取。对于其他各种不规则分布绕组可按 60°相带计算后根据经验放大 1.2～1.5 倍。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第9章 防爆感应电动机

1 防爆电机遵循的防爆标准

防爆感应电动机(以下简称防爆电机)的使用场所分为爆炸性气体环境和爆炸性粉尘环境。本章中所介绍的防爆电机主要是指爆炸性气体环境用防爆电机。

防爆电机是爆炸性气体环境用电气设备之一种。防爆电气设备在设计、制造、检验、使用中除满足电气设备的基础标准之外，还应满足相应的防爆型式的防爆标准。我国有关爆炸性气体环境用电气设备应遵循的标准见表3.9-1。

表3.9-1 爆炸性气体环境用电气设备遵循的标准

序号	标准编号	标准名称	对应的IEC标准编号
1	GB 3836.1-2000	爆炸性气体环境用电气设备 第1部分 通用要求	IEC 60079-0:1998
2	GB 3836.2-2000	爆炸性气体环境用电气设备 第2部分 隔爆型"d"	IEC 60079-1:1990
3	GB 3836.3-2000	爆炸性气体环境用电气设备 第3部分 增安型"e"	IEC 60079-7:1990
4	GB 3836.4-2000	爆炸性气体环境用电气设备 第4部分 本质安全型"i"	IEC 60079-11:1990
5	GB 3836.5-2004	爆炸性气体环境用电气设备 第5部分 外壳正压型"p"	IEC 60079-2:2001
6	GB 3836.6-2004	爆炸性气体环境用电气设备 第6部分 油浸型"o"	IEC 60079-6:1995
7	GB 3836.7-2004	爆炸性气体环境用电气设备 第7部分 充砂型"q"	IEC 60079-5:1997
8	GB 3836.8-2003	爆炸性气体环境用电气设备 第8部分 "n"型电气设备	IEC 60079-15:2001
9	GB 3836.9-1990	爆炸性气体环境用电气设备 第9部分 浇铸型"m"	IEC 60079-18:1992
10	GB 3836.11-1991	爆炸性气体环境用电气设备 最大试验安全间隙测定方法	IEC 60079-1A:1975
11	GB 3836.12-1991	爆炸性气体环境用电气设备 气体或蒸汽混合物按照其最大试验安全间隙和最小点燃电流的分级	IEC 60079-12:1975
12	GB 3836.13-1997	爆炸性气体环境用电气设备 第13部分 爆炸性气体环境用电气设备的检修	IEC 60079-19:1993
13	GB 3836.14-2000	爆炸性气体环境用电气设备 第14部分 危险场所分类	IEC 60079-10:1995
14	GB 3836.15-2000	爆炸性气体环境用电气设备 第15部分 危险场所电气安装(煤矿除外)	IEC 60079-6:1996

2 防爆电机的防爆型式、类别和温度组别

防爆电机的防爆型式主要有隔爆型"d"，增安型"e"，正压型"p"及"n"型四种。

防爆电机分为两类：

Ⅰ类为煤矿用防爆电机；Ⅱ类为除煤矿外的其他爆炸性气体环境用防爆电机。

Ⅰ类防爆电机，其爆炸性气体环境除甲烷之外，可能还含有其他成分爆炸性气体，应按Ⅰ类和Ⅱ类相应气体的要求进行制造和检验，并应有相应标志。

Ⅱ类隔爆型"d"、"n"型防爆电机可按爆炸性气体混合物的最大试验安全间隙分为ⅡA、ⅡB、ⅡC类。

标志ⅡB的电机可适用于ⅡA电机的使用条件，标志ⅡC的电机可适用于ⅡA和ⅡB电机的使用条件。

Ⅰ类防爆电机不分温度组别，其最高表面温度不应超过：

150℃，当电机表面可能堆积煤尘时。

450℃，当电机表面不会堆积或采取措施(例如密封防尘或通风)可以防止堆积煤尘时。

Ⅱ类防爆电机按其允许最高表面温度分为T1～T6组，见表3.9-2。

表3.9-2 Ⅱ类防爆电机的最高表面温度分组

温度组别	T1	T2	T3	T4	T5	T6
最高表面温度(℃)	450	300	200	135	100	80

防爆电机的防爆型式、类别和温度组别用防爆标志表明。防爆标志举例如下：

ExdⅠ：	Ⅰ类	隔爆型	
ExdⅡBT3：	Ⅱ类	隔爆型	ⅡB级爆炸性气体 T3组
ExeⅡT3：	Ⅱ类	增安型	T3组
ExPⅡT4：	Ⅱ类	正压型	T4组
ExnⅡAT4：	Ⅱ类	n型	ⅡA级爆炸性气体 T4组
ExePⅡT4：	Ⅱ类	主体增安型	具有正压型部件 T4组
ExdⅠ/ⅡBT3：	Ⅰ类	隔爆型	并有ⅡB级T3组爆炸性气体

3 防爆电机的防爆通用要求

3.1 风扇风罩

1) 外扇冷电机的外风罩的通风孔防护等级，进风端应不低于IP20，出风端应不低于IP10。

2) 立式电机应有防止垂直落下的异物进入通风孔的措施。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3）风扇、风罩和通风孔挡板应能满足 GB 3836.1 规定的冲击试验的要求。

4）正常工作状态下，外风扇、风罩、通风孔挡板和它们的紧固零件相互间的距离最小为风扇最大外径的 1/100，且不小于 1mm。当有关零件经过机械加工时，此距离允许缩小到 1mm。

5）用塑料制造的圆周速度超过 50m/s 的外风扇的表面电阻，按 GB 3836.1 规定的方法测量，应不大于 1GΩ。

6）用含轻金属制造的外风扇。

对于Ⅰ类防爆电机，按质量百分比，铝、钛和镁的总含量不允许大于 15%，且钛和镁的含量不大于 6%。

对于Ⅱ类防爆电机，按质量百分比，含镁量不允许大于 6%。

3.2　接地

1）防爆电机应在接线盒内设置接地装置。

2）防爆电机应在金属外壳上设置外接地装置。

3）接地装置应至少保证与一根导线可靠连接，导线最小截面积见表 3.9-3。

表 3.9-3　　保护导线最小截面积

主电路导线每相截面积 S（mm^2）	对应保护线最小截面积 S_p（mm^2）
$S\leqslant 16$	S
$16<S\leqslant 35$	16
$S>35$	$0.5S$

外接地连接件至少与截面积为 $4mm^2$ 的接地线有效连接。

4）接地装置应有耐腐措施，其结构应防止导线松动、扭转，且有效地保持接触压力。

3.3　连接件和接线盒

1）电机应设置接线盒，接线盒内应设有连接件，以与外部电路相连。

2）接线盒空腔与出线口应有足够尺寸，方便导线连接。

3）接线空腔应符合相应的防爆型式。

4）接线空腔的设计，应使导线按规定连接后，爬电距离和电气间隙符合相应防爆型式标准的规定。

3.4　电缆和导管引入装置

防爆电机导线引入有电缆引入和导管引入两种方式。

1）电缆和导管引入装置装配到电机上时，它们的结构和固定不应损害电机的防爆特性。

2）对电缆引入装置的要求：

① 为保证电缆和电缆引入装置的密封，可用弹性密封圈、填料、金属或复合密封圈。

② 电缆引入装置和外露件的防静电要求应符合 GB 3836.1 的相应要求。

③ 弹性密封圈材料应满足 GB 3836.1 附录 D3 的老化试验要求。

④ 填料材料应符合黏结材料的规定。

⑤ 电缆引入装置应能夹紧电缆，防止电缆从引入装置中拔脱或扭转。

⑥ 电缆引入时，引入装置中不应有尖锐棱角。电缆进线口至少应有 75°的圆弧。

⑦ 引入装置的防护等级应与外壳的防护等级一致。

3）导管引入有螺纹旋入和紧固在光孔中两种型式。

4）电机上不装电缆或导管引入装置的孔，应预封堵。封堵件应符合相关防爆型式规定，且只能用工具才能拆除。

5）额定工作状态下，电缆或导管引入装置部位的温度应不超过 70℃，芯线分支部位不应超过 80℃。

4　隔爆型电机的设计和结构特点

隔爆型电机外壳能够承受通过外壳任何接合面或结构间隙渗透到外壳内部的可燃性混合物在内部爆炸而不损坏，并且不会引起外部由一种、多种气体或蒸汽形成的爆炸性环境的点燃。

4.1　隔爆外壳的强度和材质

隔爆外壳应能承受内部试验压力而不发生损坏或引起结构强度降低，或接合面处间隙产生永久性增大，出现超过 GB 3836.2 表 1～表 4 中规定间隙值的变形。

承受内部爆炸压力的试验，在检验机关是采用动压法，而在制造厂则多使用静压法。

静压法的试验压力为：Ⅰ类、ⅡA、ⅡB 类为 1.0MPa，ⅡC 类为 1.5MPa。加压时间为 10～12s。试验时，外壳无结构损坏，也未发生永久变形，接合面的任何部位也未发现永久性增大，也未发现漏水，即视为静压试验合格。

GB 3836.2 未规定Ⅱ类电气设备隔爆外壳的材质，但对Ⅰ类矿用隔爆电机则规定：采掘工作面电机的外壳须采用钢板或铸钢制成。非采掘工作面的电机外壳可用牌号不低于 HT250 的灰铸铁制成。

应尽可能消除外壳内部空腔的结构产生的压力重叠现象造成的内部压力异常增高对外壳的损坏。

4.2　电缆和导线的引入和连接

电缆和导线的引入和连接有以下两种方式：

1）间接引入。用接线盒或插接装置的连接方式。

2）直接引入。接入主外壳内的连接方式。

直接引入是指电源电缆与电机引出线直接连接或在与主外壳互通的接线盒内连接的方式。Ⅰ类防爆电机的直接引入须符合下列条件：

1）正常运行时不产生火花、电弧和危险温度。

2）电机的额定功率不大于 250W，电流不大于 5A。

间接引入是指电源电缆与电机引出线的连接必须通过接线盒或插接装置。间接引入不应改变主外壳的防护等级。

间接引入时，Ⅰ类防爆电机主空腔与接线盒空腔之过渡应采用隔爆或胶封结构。Ⅱ类防爆电机，主空腔与接线盒空腔之过渡应采用隔爆、胶封或密封结构。

间接引入装置，有带橡胶密封圈和用填料密封两种结构。

带橡胶密封圈的引入装置的结构要求是：

1）外径尺寸相同，内径尺寸不同的密封圈非压缩轴向长度为：

圆形电缆直径不大于 20mm，非圆形电缆截面圆周长不大于 60mm 时，最小为 20mm。

圆形电缆直径大于 20mm，非圆形电缆截面圆周长大于 60mm 时，最小为 25mm。

2）仅使用一种规定的橡胶密封圈，其最小非压缩轴向长度为 5mm，但对于Ⅰ类和ⅡC 类，容积大于 $2000cm^3$ 的隔爆外壳，最小轴向非压缩长度应符合上述 1）款的规定。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

用填料密封的电缆引入装置的结构要求：

1）填料密封的最小轴向长度为20mm。

2）应规定允许使用电缆芯线最大外接圆直径。

3）应规定通过填料的最多芯线数。

引入装置有螺纹接合面时，螺纹应符合GB 3836.2中5.3条要求。对圆柱形螺纹，螺纹部分至少有8mm长度，并不少于6扣。

4.3 紧固件

1）紧固隔爆外壳任何部件的紧固螺栓孔不应穿透外壳壁，孔周围的金属厚度应不小于孔径的1/3，且至少为3mm。

2）螺栓在无垫圈且完全拧入孔内后，螺栓尾部与螺孔底部之间应留有螺纹余量。

3）为制造方便而钻孔穿透外壳壁时，应用符合GB 3836.2表5要求的螺塞将其封堵，并应可靠地焊接或铆接。

4）永久固定在外壳上的螺钉或螺栓应予可靠焊接或铆接，或其他等效固定方法。

5）应采取防止紧固件振动而松脱的措施。

4.4 隔爆接合面型式及结构参数

所谓隔爆接合面是指隔爆外壳的各个部件相对表面配合在一起并能阻止内部的爆炸向外壳周围的爆炸性气体环境传播的接合面。隔爆型电机的隔爆外壳部件一般有接线盒、接线盒座、接线端子、端子套、机座、端盖、轴承内盖、轴等。

隔爆型电机的隔爆接合面型式一般有平面接合面、圆筒接合面、止口接合面和螺纹接合面等，各种接合面型式用于隔爆外壳的部位一般是：

1）机座-端盖接合面，一般用止口接合面的圆筒部分；对ⅡC级电机也将止口接合面的圆筒部分和平面部分计算在内。

2）轴-与轴孔接合面，一般采用圆筒式接合面，也可采用轴向曲路式、推盖式或浮动式等。

3）接线盒座-机座接合面，一般采用平面式接合面，ⅡC级电机采用圆筒接合面。

4）接线盒盖-接线盒座，一般采用平面接合面，ⅡC电机采用圆筒式接合面。

5）端子套-接线盒座，采用圆筒式接合面。

6）接线板-接线座，采用圆筒式接合面。

7）接线端子-端子套，采用圆筒式接合面。

隔爆接合面的隔爆参数主要有：

平面接合、圆筒形止口的隔爆面宽度、隔爆间隙符合GB 3836.2的规定。

隔爆接合面表面粗糙度R_a不超过6.3μm。

对螺纹接合面，Ⅰ类、ⅡA、ⅡB类外壳，最小啮合线数为5扣；当容积大于100cm³时，最小啮合轴向长度为8mm。当容积不大于100cm³时，最小轴向啮合长度为5mm。

Ⅰ类电机的螺纹接合面须有防止自行松脱的措施；ⅡC类电机，螺纹接合面应符合GB 3836.2的规定。

隔爆电机转轴的最小单边间隙，对于Ⅰ类、ⅡA、ⅡB类应不小于0.075mm；对于ⅡC类，应不小于0.05mm。

滚动轴承的转轴轴承盖间的最大单边间隙以应不超过GB 3836.2规定的轴承盖允许最大间隙的2/3。

ⅡC类电机不允许采用滑动轴承。

4.5 隔爆接合面的处理

隔爆接合面应进行耐腐处理，如电镀、磷化、涂204-1防锈油脂等，但不允许涂漆。

隔爆型电机的结构示意图如图3.9-1所示。

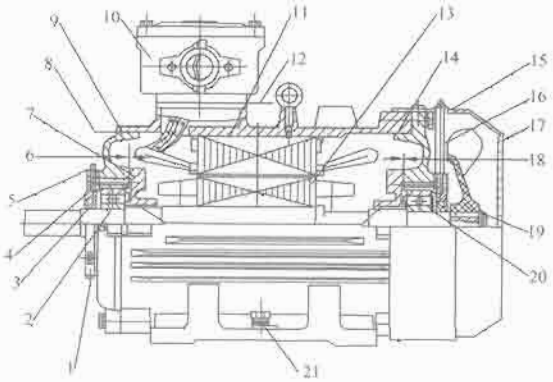


图3.9-1 隔爆型电机结构图

1—排油螺钉；2—轴承；3—V形环；4—轴承外盖；5—油杯；6、8、12、14、18—隔爆接合面；7—轴承内盖；9—端盖；10—接线盒；11—定子；13—转子；15—油塞；16—油管；17—风罩；19—挡圈；20—挡油环；21—接地螺栓

5 增安型电机的设计和结构特点

增安型“e”是对在正常运行条件下，不会产生电弧或火花的电气设备进一步采取措施，提高其安全程度，防止电气设备产生危险温度、电弧和火花的可能性的防爆型式。

为提高安全程度，防止产生危险温度、电弧和火花的可能性，增安型电机设计应注意以下问题。

5.1 内部导线连接

电机内部的导线连接不允许承受机械应力，导线连接的方法可采用压接、硬钎焊、熔焊，机械连接后再用软钎焊等。

5.2 电气间隙和爬电距离

两个导电部分之间的最短空间距离称为电气间隙，两个导电部分之间沿绝缘材料表面的最短距离，称为爬电距离。

增安型电机不同电位裸露带电部分之间的电气间隙和爬电距离见表3.9-4。

表3.9-4 电气间隙和爬电距离

工作电压U（V）	最小爬电距离（mm）			最小电气间隙（mm）
	材料级别			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲa	
≤15	1.6	1.6	1.6	1.6
15<U≤30	1.8	1.8	1.8	1.8
30<U≤60	2.1	2.6	3.4	2.1
60<U≤110	2.5	3.2	4	2.5
110<U≤175	3.2	4	5	3.2
175<U≤275	5	6.3	8	5
275<U≤420	8	10	12.5	6
420<U≤550	10	12.5	16	8
550<U≤750	12	16	20	10

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

工作电压 U（V）	最小爬电距离（mm）			最小电气间隙（mm）
	材料级别			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲa	
$750<U\leqslant1100$	20	25	32	14
$1100<U\leqslant2200$	32	36	40	30
$2200<U\leqslant3300$	40	45	50	36
$3300<U\leqslant4200$	50	56	63	44
$4200<U\leqslant5500$	63	71	80	50
$5500<U\leqslant6600$	80	90	100	60
$6600<U\leqslant8300$	100	110	125	80
$8300<U\leqslant11000$	125	140	160	100

电气间隙按电机额定电压给出。

爬电距离则根据额定电压、绝缘材料的耐泄痕性和绝缘件表面形状确定。

常用绝缘材料和相比起痕指数分级举例见 GB 3836.3 附录 F。

5.3　绕组

1）要求绕组绝缘导线至少为两层绝缘，漆包线应使用厚膜绝缘。

2）绕组制成后应干燥，并用沉浸、滴浸或真空压力浸渍（VPI）等方法处理，浸渍漆应是无溶剂的。如浸渍漆含有溶剂，则浸渍和干燥应至少进行两次。

3）绕组不能采用公称直径小于 0.25mm 导线绕制。

5.4　极限温度

1）增安型电机的部件温度应符合下列要求：

①不超过相应温度组别所规定的最高表面温度。

②不超过规定材料的耐热温度。

2）绝缘绕组的极限温度应不超过表 3.9-5 的规定值，表中 t_E 见 5.8 节。

表 3.9-5　　绝缘绕组的极限温度

极限温度		温度测量方法	符合 GB/T 11021 的绝缘材料的耐热等级（℃）				
			A	E	B	F	H
额定运行时的极限温度	单层绝缘绕组	电阻法或温度计法	95	110	120	130	155
	其他绝缘绕组	电阻法	90	105	110	130	155
		温度计法	80	95	100	115	135
时间 t_E 终了时的极限温度	—	电阻法	160	175	185	210	235

3）应采用保护装置，保护绕组不超过极限温度。

5.5　外壳防护等级

1）增安型电机内部装有裸露带电零部件的外壳，应至少具有 IP54 防护等级。

2）增安型电机内部仅装有绝缘带电零部件的外壳，应至少具有 IP44 防护等级。

3）装有冷却空气进出口管道接头的封闭式电动机，管道接头进出口的防护等级须符合 IP20。管道安装后，外壳至少具有 IP44 的防护能力。

4）清洁、室内环境且有专门培训人员检查管理的Ⅱ类电动机的外壳须符合 IP20 的规定。

5.6　最小径向单边间隙

增安型电机定转子之间的最小径向单边间隙，在静止时应不低于下列公式计算值。

$$\delta=\left[0.15+\frac{D-50}{780}\left(0.25+\frac{0.75n}{1000}\right)\right]rb$$

式中，δ 最小径向单边间隙，mm；D 为转子直径，mm，最小值取 75mm，最大值取 750mm；n 为最高额定转速，r/min，最小值取 1000r/min；r 为系数，r＝铁心长度/$(1.75D)$，最小值取 1.0；b 为系数，滚动轴承电机取 b＝1.0，滑动轴承电机取 b＝1.5。

滑动轴承电动机必须设测隙孔。滚动轴承电动机宜设测隙孔。

5.7　笼型转子电动机

笼型转子导条和端环如不是铸成一体，则导条与端环应采用硬钎焊或熔焊连接。为防止起动时导条与转子铁心间的火花，导条应和槽紧密配合，紧密配合的办法可采用附加槽衬、槽楔、少量过盈或挤紧等。

5.8　t_E 时间和起动电流比 I_A/I_N

t_E 时间是指交流绕组在最高环境温度下达到额定运行稳定温度后，从开始通过最初起动电流 I_A 时计起，直到上升到极限温度所需的时间。

起动电流比 I_A/I_N 是指最初起动电流 I_A 与额定电流 I_N 之比。

t_E 时间最小值和起动电流比的关系如图 3.9-2 所示。

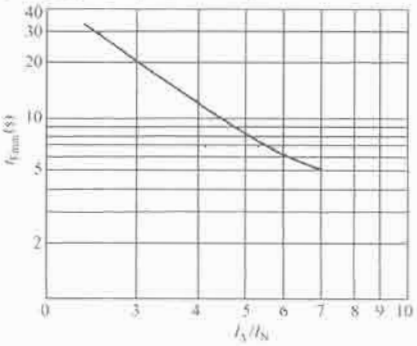


图 3.9-2　电动机 t_E 时间最小值与起动电流比 I_A/I_N 的关系

t_E 时间应不小于当转子堵转时，过载保护装置能够切断电源所需时间。电动机 t_E 时间大于按图 3.9-2 起动电流比 I_A/I_N 确定的 t_E 时间最小值则一般可满足上述要求。

t_E 时间不允许小于 5s，起动电流比 I_A/I_N 不允许大于 10。

6　“n”型电机的设计和结构特点

“n”型防爆是电气设备的一种防爆型式，这种型式的电气设备，在正常运行时和标准规定的一些异常情况下，不能点燃周围的爆炸性气体环境。即是说，“n”型防爆适用于：

1）正常运行中不产生火花、电弧和热表面的电气设备。

2）正常运行中产生电弧、火花和热表面的部件或电路，用标准规定的一些方法保护就不能引起周围爆炸性环境点燃的电气设备。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

"n"型电机是"n"型电气设备的一种。它的结构特点如下：

1）"n"型电机属Ⅱ类，又可细分为ⅡA、ⅡB、ⅡC。

2）"n"型电机的任何外表面和内表面的最高表面温度应低于爆炸性气体环境的引燃温度，即应符合T1～T6组的最高表面温度。确定温度组别时，对于S1、S2工作制的电机，可不考虑起动温升。

3）外壳机械强度应满足按标准规定的冲击试验要求。

4）为防止由于杂散磁场而引起的环行电流的影响，外壳部件或结构件间应有足够数量和截面的等电位连接和适当数量的紧固件。

5）不同电位导电部件之间的最小爬电距离、电气间隙和间隔按表3.9-6的规定。

表3.9-6 最小爬电距离、电气间隙和间隔

工作电压U（V）（交流有效值或直流值）	最小爬电距离（mm）				最小电气间隙和间隔（mm）		
	材料级别				空气中	密封	浇封或固体绝缘
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲa	Ⅲb			
≤10	1	1	1	1	0.4	0.3	0.2
≤12.5	1.05	1.05	1.05	1.05	0.4	0.3	0.2
≤16	1.1	1.1	1.1	1.1	0.8	0.3	0.2
≤20	1.2	1.2	1.2	1.2	0.8	0.3	0.2
≤25	1.25	1.25	1.25	1.25	0.8	0.3	0.2
≤32	1.3	1.3	1.3	1.3	0.8	0.3	0.2
≤40	1.4	1.6	1.8	1.8	0.8	0.6	0.3
≤50	1.5	1.7	1.9	1.9	0.8	0.6	0.3
≤63	1.6	1.8	2	2	0.8	0.6	0.3
≤80	1.7	1.9	2.1	2.1	0.8	0.8	0.6
≤100	1.8	2	2.2	2.2	0.8	0.8	0.6
≤125	1.9	2.1	2.4	2.4	1	0.8	0.6
≤160	2	2.2	2.5	2.5	1.5	1.1	0.6
≤200	2.5	2.8	3.2	3.2	2	1.7	0.6
≤250	3.2	3.6	4	4	2.5	1.7	0.6
≤320	4	4.5	5	5	3	2.4	0.8
≤400	5	5.6	6.3	6.3	4	2.4	0.8
≤500	6.3	7.1	8	8	5	2.4	0.8
≤630	8	9	10	10	5.5	2.9	0.9
≤800	10	11	12.5	—	7	4	1.1
≤1000	11		13	—	8	5.8	1.7
≤1250	12		15	—	10	—	—
≤1600	13		17	—	12	—	—
≤2000	14		20	—	14	—	—
≤2500	18		25	—	18	—	—
≤3200	22		32	—	22	—	—
≤4000	28		40	—	28	—	—
≤5000	36		50	—	36	—	—
≤6300	45		63	—	45	—	—
≤8000	56		80	—	56	—	—
≤10000	71		100	—	70	—	—
≤11000	78		110	—	75	—	—
≤13800	98		138	—	97	—	—
≤15000	107		150	—	105	—	—

6）"n"型电机裸露带电部件外壳的防护等级应不低于IP54，其他情况下不低于IP20。转子笼端环或导条不视为裸露带电部件。

对连接在运行电压至1000V电机的接线盒，在电机的防护等级为IP44及以上时，接线盒空腔可与电机内部连通。接线盒的防护等级应不低于IP54。

导管填料盒、电缆密封盒、分线盒等的防护等级应不低于IP54。

7）如果中性点连接件不作为对该电机的交流电源连接件使用时，则最小爬电距离和电气间隙要求，应按表3.9-7规定的假定工作电压确定。

表3.9-7 假定中性点工作电压

工作电压U（V）（交流有效值或直流值）	中性点的假定工作电压（V）
≤1100	U
1100<U≤3300	1100
3300<U≤6600	3300
6600<U≤11000	6600
11000<U≤15000	11000

8）最小径向单边间隙的计算公式与增安型电机相同。

9）通风系统的外风罩的通风孔、通风系统的结构与安装、通风系统的间距、风扇材料应符合GB 3836.1的相关要求。

10）对于滚动轴承固定部分和旋转部分之间，任何非摩擦密封或曲路密封的最小径向间隙或轴向间隙应不小于0.05mm，对于滑动轴承该间隙应为0.1mm。

11）笼型转子。由导条与端环连接成的转子笼应采取措施，防止产生点燃电弧或火花。导条与端环的连接应采用铜焊或熔焊。

铸造转子笼应用压铸、离心铸铝等其他等效方法制造，保证槽完全填实。

12）"n"型电机的防爆标志应包括：符号Exn；无火花设备A；类别符号ⅡA、ⅡB或ⅡC；温度组别T1～T6。

例：ExnAⅡBT4 ⅡB组爆炸性气体，温度组别为T4的无火花型电机。

7 正压外壳型电机的设计和结构特点

正压外壳型电机，简称正压型电机，是正压外壳型电气设备的一种。

正压型电机是具有正压型外壳的防爆电机。所谓正压外壳是保持内部保护气体的压力高于外部环境大气压力，故可阻止外部爆炸性气体进入外壳内部，从而防止内部的爆炸。

1）正压型电机的防爆型式为Py。Py型正压即将正压外壳内的危险分类从1区降到2区的正压保护。

2）正压外壳的防护等级最低为IP40。

3）正压外壳的管道和它们的连接部件应能承受在正常运行时所有排气孔封闭状态下的最大正压的1.5倍压力，最低为200Pa。

4）外壳内所有气孔、隔板、间隔和元件应妥善设置，保证有效换气。

5）所有与外壳连接的电缆和导管应密封，以保证外壳防护等级。

6）正压型电机的温度极限应按外壳的最高外表面温度，及内部零件的最高表面温度中的较高者确定。

7）由制造厂或用户设置安全装置。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

①应规定安全装置的最高和最低动作值和公差。

②应提供一个或多个自动安全装置，以便在正压外壳内的正压降低到规定的最低值时动作。

③应规定最低换气流量和换气时间，此流量和时间可按 5 倍外壳容积换气量来确定。

④可能产生泄露的正压外壳及其管道内相对于外部压力应保持的最低正压为 50Pa。

⑤保护气体可以是空气、氮气或其他非可燃性气体，保护气体进入外壳处的温度不超过 40℃。

8）正压型电机的防爆标志应包括：标志 Ex；防爆型式 Py；类别Ⅱ；温度组别 T1～T6。

例：ExPyⅡT4　Ⅱ类设备，温度组别为 T4 的正压外壳型电机。

8　防爆电机的选型

防爆电机使用于爆炸危险场所。正确选型关系到电机的可靠运行。在选择防爆电机的时候，除了满足正常的传动要求之外，还应满足防爆要求。防爆电机选型要考虑下列因素：

1）要确定防爆电机使用场所的爆炸危险的分区。

2）要确定防爆电机使用场所可能出现爆炸性气体混合物的成分和含量。

3）如有两种以上爆炸性气体，应按危险程度较高的气体，查相关资料，确定爆炸性气体的级别和温度组别。

4）按爆炸危险程度较高的那种气体的级别和温度组别确定防爆电机的级别和温度组别。

5）当使用环境还有其他的环境条件和外部影响因素，如户外、湿热带、干热带、化学腐蚀、高温、以及机械作用等时，还应考虑防爆电机能满足这些要求而不降低防爆性能。

6）选用增安型、正压型防爆电机时，还应配备相应的保护装置。

防爆电机防爆型式的选择见表 3.9-8。

表 3.9-8　防爆电机防爆型式的选择

爆炸危险区域 / 防爆结构 / 电机类型	1 区			2 区			
	隔爆型 d	正压型 p	增安型 e	隔爆型 d	正压型 p	增安型 e	无火花型 n
笼型感应电动机	○	○	△	○	○	○	○
绕线转子感应电动机	△	△	—	○	○	○	×
同步电动机	○	○	×	○	○	○	—
直流电动机	△	△	—	○	○	—	—
电磁转差离合器（无电刷）	○	△	×	○	○	○	△

注　1. 表中符号：○为适用，△为慎用，×为不适用。

2. 绕线型感应电动机及同步电动机采用增安型时，其主体是增安型防爆结构，发生火花的部分是隔爆型或正压型防爆结构。

3. 无火花型电动机在通风不良及户内具有比空气重的爆炸性气体区域内慎用。

9　防爆电机主要产品介绍

防爆电机主要产品见表 3.9-9。

表 3.9-9　防爆电机主要产品介绍

序号	型号、产品名称	标准号	机座号	极数	功率范围（kW）	电压等级（V）	防爆标志	防护等级	绝缘等级	备注
1	YB2 系列隔爆型三相异步电动机（机座号 63～355）	JB/T 7565.1—2004	63～355	2～10	0.12～315	380 660 380/660	d Ⅰ d Ⅱ AT4 d Ⅱ BT4	IP55	F	
2	YB2-W、YB2-TH、YB2-THW、YB2-TA、YB2-TAW 系列隔爆型三相异步电动机（机座号 63～355）	JB/T 7565.2—2004	63～355	2～10	0.12～315	380 660 380/660	d Ⅰ d Ⅱ AT4 d Ⅱ BT4	IP55	F	
3	YB2-F1、YB2-WF1、YB2-F2、YB2-WF2 系列防腐、户外防腐隔爆型三相异步电动机（机座号 63～355）	JB/T 7565.3—2004	63～355	2～10	0.12～315	380 660 380/660	d Ⅱ BT1 d Ⅱ BT2 d Ⅱ BT3 d Ⅱ BT4	IP55	F	
4	YB2 系列隔爆型（Exd Ⅱ CT1～T4）三相异步电动机（机座号 63～355）	JB/T 7565.4—2004	63～355	2～10	0.12～315	380 660 380/660	d Ⅱ CT1 d Ⅱ CT2 d Ⅱ CT3 d Ⅱ CT4	IP55	F	
5	YBF2 系列风机用隔爆型三相异步电动机（机座号 63～355）	JB/T 7565.5—2004	63～355	2～10	0.12～315	380 660 380/660	d Ⅰ d Ⅱ AT4 d Ⅱ BT4	IP55	F	
6	YB2-H 系列船用隔爆型三相异步电动机（机座号 63～355）	JB/T 7565.6—2004	63～355	2～10	0.12～315	380 440	d Ⅱ AT4 d Ⅱ BT4	IP55	F	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

序号	型号、产品名称	标准号	机座号	极数	功率范围（kW）	电压等级（V）	防爆标志	防护等级	绝缘等级	备注
7	YBK2系列煤矿井下用隔爆型三相异步电动机（机座号100～315）	JB/T 9593.1—2002	100～315	2～10	2.2～200	380/660 660/1140	dⅠ	IP55	F	
8	YA系列增安型三相异步电动机（机座号80～280）	JB 9595—1999	80～280	2～8	0.55～90	380	eⅡT1 eⅡT2 eⅡT3	IP54	F	
9	YA系列增安型三相异步电动机（机座号315～355）	JB 8972—1999	315～355	2～10	45～280	380	eⅡT1 eⅡT2 eⅡT3	IP54	F	
10	YA-W、YAWF1系列户外、户外防腐增安型三相异步电动机（机座号80～280）	JB 6763—1993	80～280	2～8	0.55～90	380	eⅡT1 eⅡT2 eⅡT3	IP54	F	
11	YW系列无火花型三相异步电动机（机座号80～315）	JB 5337—1991	80～315	2～8	0.55～200	220 380 660 220/380 380/660	nⅡT3	IP44 IP55	F	
12	YBX系列高效率隔爆型三相异步电动机（机座号80～355）	企标	80～355	2～8	0.55～315	380 660 380/660	dⅠ dⅡAT4 dⅡBT4 dⅡCT4	IP54	F	
13	YAX系列高效率增安型三相异步电动机（机座号80～355）	企标	80～355	2～8	0.55～315	380 660 380/660	eⅡT1 eⅡT2 eⅡT3	IP55	F	
14	YBP系列变频调速隔爆型三相异步电动机（机座号80～355）	企标	80～355	2～8	0.55～315	380 660 380/660	dⅠ dⅡAT4 dⅡBT4	IP54 IP55	F	
15	YB系列高压隔爆型三相异步电动机（机座号355～450）	JB 8674—1997	355～450	2～10	160～500	6000	dⅠ dⅡAT4 dⅡBT4 dⅡCT4	IP44 IP55	F	
16	YB系列高压隔爆型三相异步电动机（机座号560～710）	企标	560～710	2～8	500～1800	6000	dⅠ dⅡA dⅡB	IP54 IP55	F	
17	YA系列增安型三相异步电动机（机座号355～450）	企标	355～450	2～10	132～450	6000	eⅡT1 eⅡT2 eⅡT3	IP54 IP55	F	
18	YAKK系列高压增安型三相异步电动机（机座号355～630）	企标	355～630	2～12	185～2000	6000	eⅡT1 eⅡT2 eⅡT3	IP54 IP55	F	
19	YAKS系列高压增安型三相异步电动机（机座号355～630）	企标	355～630	2～12	185～2500	6000	eⅡT1 eⅡT2 eⅡT3	IP54 IP55	F	
20	YAKK系列高压增安型三相异步电动机（机座号710～1000）	企标	710～1000	4～16	560～8000	6000	eⅡT1 eⅡT2 eⅡT3	IP54 IP55	F	
21	YAKS系列高压增安型三相异步电动机（机座号710～1000）	企标	710～1000	4～16	630～9000	6000	eⅡT1 eⅡT2 eⅡT3	IP54 JP55	F	
22	TAW系列增安型无刷励磁同步电动机	JB 8974—1999	—	12～24	250～10000	6000	eⅡT1 eⅡT2 eⅡT3	IP54	F	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 10 章　起重及冶金用三相感应电动机

1　起重及冶金用三相感应电动机的特性及用途

1.1　特性

起重及冶金用三相感应电动机的主要特性是具有较大的过载能力和较高的机械强度及较好的动态特性，多为短时或断续运行。电动机按不同工作制的规定可频繁地起动、制动及逆转，往往还伴有不同形式的过载与超速。

起重及冶金用三相感应电动机的工作制分为 S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7 及 S9 八种类型，常见的有 S3、S4、S5 三种典型工作制，分别如图 3.10-1～图 3.10-3 所示。

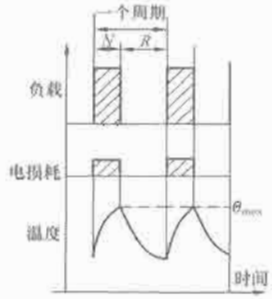


图 3.10-1　断续周期工作制（S3 工作制）

N—在额定条件下运行时间；R—停止和断能时间；θ_{max}—在工作的周期中达到的最高温度；负载持续率 $= N/(N+R)\times 100\%$

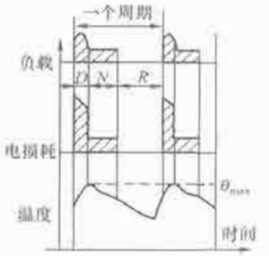


图 3.10-2　断续周期工作制（S4 工作制）

D—起动时间；N—在额定条件下运行时间；R—停止和断能时间；θ_{max}—在工作的周期中达到的最高温度；负载持续率 $= (D+N)/(D+N+R)\times 100\%$

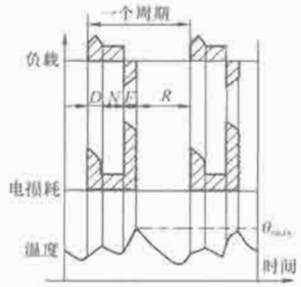


图 3.10-3　断续周期工作制（S5 工作制）

D—起动时间；N—在额定条件下运行时间；F—电制动时间；R—停止和断能时间；θ_{max}—在工作的周期中达到的最高温度；负载持续率 $= (D+N+F)/(D+N+F+R)\times 100\%$

1.2　用途

起重及冶金用三相感应电动机是指用于各种起重机械的行走、起升、回转及冶金辅助设备的电力传动的各种类型电动机。这些设备包括桥式起重机、门式起重机、座式起重机、塔式起重机、电动葫芦以及辊道、轧机、转炉等。其应用场所遍及工厂、矿山、港口、船舶、建筑工地、水库、电站等。

2　起重及冶金用三相感应电动机的设计及结构特点

1）起重及冶金用三相感应电动机具有过载能力强、转矩大等特点，最大转矩倍数一般在 2.5～3.0 范围内，设计时气隙磁通密度一般在 0.65～0.75T 之间。同时，为了提高运行可靠性，其气隙比通用电动机的大，空载电流最大可达额定电流的 60%～65%，功率因数较低。

2）能适应频繁地起动、制动及逆转。设计时，电动机的定子铁心外径与长度比 $\lambda(D/l)$ 值为 1.2 左右，以降低 GD^2 和缩短起动时间。为改善笼型三相感应电动机的起动性能，转子采用硅铝合金或铝锰合金压铸。

3）能适应经常的较严重的机械振动、冲击和超速。

4）能适应粉尘环境。外壳防护等级主体不低于 IP54，接线盒为 IP55。冷凝水排泄孔在运输和储存过程中是密封的，正常运行时开启，但电动机主体为 IP55 时，运行时也应密封。

5）机座号 180 及以上的电动机一般为锥形轴伸，轴伸的锥度为 1∶10。

3　起重及冶金用三相感应电动机的主要产品

3.1　起重及冶金用三相感应电动机产品分类

起重及冶金用三相感应电动机分为基本系列及其派生产品、锥形转子电动机、塔式起重机用电动机、辊道用电动机四种类型。

1）基本系列及其派生产品。起重及冶金用三相异步电动机基本系列包括 YZR3、YZR2、YZ2、YZR、YZ 系列产品，在基本系列基础上派生的产品如 YZRE、YZE 系列起重及冶金用电磁制动三相异步电动机、YZRW 系列起重及冶金用涡流制动绕线转子三相异步电动机、YZP 系列起重及冶金用变频调速三相异步电动机、YZD 系列起重用多速三相异步电动机、YZRS 系列起重及冶金用绕线转子双速三相异步电动机、YZRF、YZRG 系列强迫通风型绕线转子三相异步电动机、YBZS 系列起重用隔爆型双速三相异步电动机、YBZE、YBZSE 系列起重用隔爆型电磁制动三相异步电动机等。

2）锥形转子电动机。起重用锥形转子制动三相异步电动机包括 YREZ、YEZ、YEZX、YEZS、YBEZ、YBEZX 等系列锥形转子电动机。

3）塔式起重机用电动机。塔式起重机用电动机包括 YZRSW 系列塔式起重机用涡流制动绕线转子双速三相异步电动机、YZTD 系列塔式起重机用多速三相异步电动机等。

4）辊道用电动机。辊道用电动机包括 YG 系列辊道用三相异步电动机、YGP 系列辊道用变频调速三相异步电动机等。

3.2　起重及冶金用三相感应电动机主要产品及特征

起重及冶金用三相感应电动机主要产品及特征见表 3.10-1。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3.10-1 起重及冶金用三相感应电动机的主要产品及特征

型号	产品名称	机座号、功率范围与极数	主要参数	结构特征	主要用途
YZR3	起重及冶金用绕线转子三相异步电动机	机座号：100～400 功率：1.5～250kW 极数：4、6、8、10	基准工作制：S3，40% $T_M=(2.5\sim2.8)T_N$ 4极，$n_{max}=2.0n_0$ 6、8、10极，$n_{max}=2.5n_0$ 起重用电动机当可靠寿命为2.5年时，可靠度大于或等于0.95；冶金用电动机当可靠寿命为3年时，可靠度大于或等于0.95	绝缘等级：F、H级 防护等级：电动机IP54 接线盒IP55 冷却方式：IC411	F级绝缘电动机用于40℃环境的起重机械 H级绝缘电动机用于60℃环境的起重机械及冶金设备
YZR2	起重及冶金用绕线转子三相异步电动机	机座号：100～400 功率：1.5～250kW 极数：4、6、8、10	基准工作制：S3，40% $T_M=(2.4\sim2.8)T_N$ 4极，$n_{max}=2.0n_0$ 6、8、10极，$n_{max}=2.5n_0$ 起重用电动机当可靠寿命为2.5年时，可靠度大于或等于0.95；冶金用电动机当可靠寿命为3年时，可靠度大于或等于0.95	绝缘等级：F、H级 防护等级：电动机IP54 接线盒IP55 冷却方式：IC411	同YZR3
YZ2	起重及冶金用三相异步电动机	机座号：112～250 功率：1.5～37kW 极数：6、8	基准工作制：S3，40% $T_M=(2.0\sim2.5)T_N$ $T_{st}=(2.0\sim2.5)T_N$ $n_{max}=2.5n_0$	绝缘等级：F、H级 防护等级：电动机IP54 接线盒IP55 冷却方式：112，IC410 132～250，IC411	同YZR2，但用于不需要调速，且起动、制动不太频繁的设备
YZR	起重及冶金用绕线转子三相异步电动机	机座号：112～400 功率：1.5～200kW 极数：6、8、10	基准工作制：S3，40% $T_M=(2.3\sim2.8)T_N$ $n_{max}=2.5n_0$ 起重用电动机当可靠寿命为2.5年时，可靠度大于或等于0.93；冶金用电动机当可靠寿命为3年时，可靠度大于或等于0.95	绝缘等级：F、H级 防护等级：一般环境IP44 冶金环境IP54 冷却方式：112～132，IC410 160～400，IC411	同YZR3
YZ	起重及冶金用三相异步电动机	机座号：112～250 功率：1.5～30kW 极数：6、8	基准工作制：S3，40% $T_M=(2.0\sim2.5)T_N$ $T_{st}=(2.0\sim2.5)T_N$ $n_{max}=2.5n_0$	绝缘等级：F、H级 防护等级：一般环境IP44 冶金环境IP54 冷却方式：112～132，IC410 160～250，IC411	同YZ2
YZRE	起重及冶金用电磁制动绕线转子三相异步电动机	机座号：112～225 功率：0.75～30kW 极数：4、6、8	基准工作制：S3，40% $T_M=(2.3\sim2.8)T_N$ 4极，$n_{max}=2500$r/min 6、8极，$n_{max}=2.5n_0$ 额定静制动力矩： 5.5～300N·m	绝缘等级：F、H级 防护等级：一般环境IP44 冶金环境IP54 制动器IP23 冷却方式：112～132，IC410 160～225，IC411	用于需要自制动的场合，电动机可以自制动
YZRW	起重及冶金用涡流制动绕线转子三相异步电动机	机座号：112～280 功率：1.5～75kW 极数：6、8、10	基准工作制：电动机S3，40% 涡流制动器S3，15 $T_M=(2.3\sim2.8)T_N$ $n_{max}=2.5n_0$ 额定制动力矩：7～590N·m	绝缘等级：F、H级 防护等级：一般环境IP44 冶金环境IP54 制动器IP00 冷却方式：112～132，IC410 160～280，IC411	用于需在稳定低速下(1∶10或1∶20)运行并制动的场合
YZR(中心高450～710)	起重及冶金用中型高压绕线转子三相异步电动机	机座号：450～710 功率：280～560kW 极数：8、10	基准工作制：S3，60% $T_M=2.8T_N$ $n_{max}=2.5n_0$ 额定电压：3000V或6000V	绝缘等级：F、H级 防护等级：一般环境IP44 冶金环境IP54 冷却方式：IC611	同YZR3
YZRF	起重及冶金用强迫通风型绕线转子三相异步电动机	机座号：250～400 功率：37～200kW 极数：6、8、10	基准工作制：S1 $T_M=2.8T_N$ $n_{max}=2.5n_0$	绝缘等级：F、H级 防护等级：电动机IP23 接线盒IP54 自带风机独立通风，冷却方式IC15	用于常温环境，需加强冷却的场合
YZRG			基准工作制：S1 风量：1500～3000m³/h 风压：500～900Pa $T_M=2.8T_N$ $n_{max}=2.5n_0$	绝缘等级：F、H级 防护等级：电动机IP23 接线盒IP54 管道通风型，从外界采风，管道连电机，冷却方式IC17	用于高温环境
YZRS	起重及冶金用绕线转子双速三相异步电动机	机座号：132～355 功率：0.75～110kW 极数：4/12、4/16、4/24 4/32、6/16、6/20、6/24、8/20、8/24、8/32	基准工作制：高速：S3，40% 低速：S3，15% 高速$T_M=(2.3\sim2.8)T_N$ 低速$T_M=(1.8\sim2.3)T_N$ 高速为4极时，$n_{max}=2.0n_0$ 高速为6、8极时，$n_{max}=2.5n_0$	绝缘等级：F、H级 防护等级：一般环境IP44 冶金环境IP54 接线盒IP55 冷却方式：132，IC410 160～355，IC411	用于需要软起动和调速的场合

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

型号	产品名称	机座号、功率范围与极数	主要参数	结构特征	主要用途
YZRZ	起重专用绕线转子三相异步电动机	机座号：112～355 功率：1.5～132kW 极数：4、6、8、10	基准工作制：S3，25% $T_M=(2.3\sim2.8)T_N$ 4 极，$n_{max}=2.0n_0$ 6、8、10 极，$n_{max}=2.5n_0$	绝缘等级：F、H 级 防护等级：IP44 冷却方式：112～132，IC410 160～355，IC411	用于最大转矩要求较高，每小时起动次数要求较低的起重机械及类似设备
YBZR	起重及冶金用隔爆型绕线转子三相异步电动机	机座号：112～400 功率：1.5～200kW 极数：6、8、10	基准工作制：S3，40% $T_M=(2.3\sim2.8)T_N$ $n_{max}=2.5n_0$	绝缘等级：F、H 级 防护等级：电动机 IP54 接线盒 IP55 冷却方式：112～132，IC410 160～400，IC411 防爆级别：ⅡB 级	用于具有爆炸性混合物场所的起重机械及类似设备
YZD	起重用多速三相异步电动机	机座号：112～250 功率：0.2～30kW 极数：4/16、4/24、6/16、8/20、4/8/24	基准工作制：高速 S3，25% 低速 S3，15% 高速 $T_M=2.2T_N$，低速 $T_M=1.8T_N$ 高、低速 $T_{st}=1.8T_N$ 高速为 4 极时，$n_{max}=2.0n_0$ 高速为 6、8 极时，$n_{max}=2.5n_0$	绝缘等级：F 级 防护等级：电动机 IP44 接线盒 IP54 冷却方式：112～132，IC410 160～250，IC411	用于起动不太频繁，需双速运行的场合
YZE	起重及冶金用电磁制动三相异步电动机	机座号：112～225 功率：0.75～30kW 极数：4、6、8	基准工作制：S3，40% $T_M=(2.0\sim2.5)T_N$ $T_{st}=(2.0\sim2.5)T_N$ 4 极，$n_{max}=2500r/min$ 6、8 极，$n_{max}=2.5n_0$ 额定静制动力矩： 平移用：5.5～300N·m 起升用：30～600N·m	绝缘等级：F、H 级 防护等级：一般环境 IP44 冶金环境 IP54 制动器 IP23 冷却方式：112～132，IC410 160～225，IC411	用于需要自制动的场合，电动机可以自制动
YZZ	升降机用电磁制动三相异步电动机	机座号：132 功率：6.3～16.5kW 极数：4	基准工作制：S3，25% $T_M=(2.25\sim2.60)T_N$ $T_{st}=(2.25\sim2.60)T_N$ $n_{max}=2n_0$ 额定静制动力矩： 100～210N·m	绝缘等级：F 级 防护等级：电动机 IP54 制动器 IP23 冷却方式：IC411	用于升降机及其他起重机械需要自制动的场合
YZP、YZPF	起重及冶金用变频调速三相异步电动机	机座号：100～400 功率：1.5～300kW 极数：4、6、8、10	基准工作制：S3，40% $T_M=(2.4\sim2.8)T_N$ $T_{st}\geq1.5T_N$ 4 极，$n_{max}=2n_0$ 6、8、10 极，$n_{max}=2.5n_0$ 频率范围：5～100Hz	绝缘等级：F、H 级 防护等级：一般环境 IP44 冶金环境 IP54 冷却方式：100～132， IC410、IC416 160～400， IC411、IC416	适用于变频器供电的各种起重机械及冶金辅助设备
YZLP	平车用双值电容单相异步电动机	机座号：132～160 功率：2.2～7.5kW 极数：6	基准工作制：S3，25% $T_M=2.0T_N$ $T_{st}=2.0T_N$	绝缘等级：F 级 防护等级：电动机 IP44，接线盒 IP54 冷却方式：132，IC410 160，IC411	用于电动平车
WZ	起重及冶金用涡流制动器	机座号：160～400 匹配电动机 功率：5.5～200kW 极数：6、8、10	基准工作制：S3，15% 励磁电压：(80±15)V 或 (160±30)V 制动力矩：64～2250N·m	绝缘等级：F、H 级 防护等级：制动器 IP23，接线盒 IP44 冷却方式：IC411	以联轴器与电动机连接，可获得稳定低速，速比为 1∶10(开环)及 1∶20(闭环)，用于需要稳定低速场合
YBZE、YBZSE	起重用隔爆型电磁制动三相异步电动机	机座号：112～250 功率：0.2～37kW 极数：4、6、8、4/16、6/16、8/20	基准工作制：单速 S3，40% 双速：高速 S3，25% 低速 S3，15% 单速：$T_M=(2.0\sim2.5)T_N$ $T_{st}=(2.0\sim2.5)T_N$ 双速：高速 $T_M=2.2T_N$ $T_{st}=1.8T_N$ 低速 $T_M=1.8T_N$ $T_{st}=1.8T_N$ 高速时，$n_{max}=2.5n_0$ 额定静制动力矩： 运行用：15～90N·m 起升用：30～530N·m 制动器励磁电压：380V 或 220V	绝缘等级：F、H 级 防护等级：电动机 IP44、IP54 制动器 IP44、IP54 接线盒 IP54 冷却方式：112～132，IC410 160～250，IC411 防爆级别：ⅡA、ⅡB、ⅡC 级	用于具有爆炸性混合物场所的起重机械，电动机可以自制动

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

型号	产品名称	机座号、功率范围与极数	主要参数	结构特征	主要用途
YBZS	起重用隔爆型双速三相异步电动机	机座号：112～250 功率：0.2～30kW 极数：4/16、6/16、8/20	基准工作制：高速 S3，25% 低速 S3，15% 高速 $T_M=2.2T_N$，$T_{st}=1.8T_N$ 低速 $T_M=1.8T_N$，$T_{st}=1.8T_N$ 高速 4 极时，$n_{max}=2.0n_0$ 高速 6、8 极时，$n_{max}=2.5n_0$	绝缘等级：F 级 防护等级：电动机 IP44，接线盒 IP54 冷却方式：112～132，IC410 160～250，IC411 防爆级别：ⅡA、ⅡB、ⅡC 级	用于具有爆炸性混合物场所的起重机械及类似设备
YREZ	起重用锥形绕线转子制动三相异步电动机	机座号：100～225 功率：0.35～40kW 极数：2、4、6、4/2、8/2	基准工作制：S1、S3、40% 单速：$T_M=(2.80\sim5.10)T_N$ 双速：高速 $T_M=(2.80\sim3.85)T_N$ 低速 $T_M=(2.75\sim3.70)T_N$	绝缘等级：F 级 防护等级：电动机 IP54 制动装置 （立式）IP20 （卧式）IP22 冷却方式：IC411	用于单、双速的平移机构
YEZX	起重用锥形转子制动三相异步电动机	机座号：71～112 功率：0.04～2.4kW 极数：2、4、4/2、8/2、12/2、12/4	基准工作制： 单速：S4，40% 双速：高速 S4，40% 低速 S4，20%、S4，40% 额定制动力矩： 单速：1.4～11.8N·m 双速：1.1～8.9N·m	绝缘等级：F 级 防护等级：电动机 IP54 制动装置 （立式）IP20 （卧式）IP22 冷却方式：IC411	用于单、双速的平移机构
YEZS	起重用双速锥形转子制动三相异步电动机	机座号：71～250 功率：0.05～18.5kW 极数：2/4、2/8、4/12、2/12	基准工作制：高速 S3，40% 低速 S3，15% 高速：$T_M=(2.2\sim3.0)T_N$ $T_{st}=(2.2\sim3.0)T_N$ 低速：$T_M=(1.8\sim2.2)T_N$ $T_{st}=(1.8\sim2.2)T_N$ 2 极 $n_{max}=n_0$，4 极 $n_{max}=2n_0$ 大于 4 极 $n_{max}=2.5n_0$ 静制动力矩不小于轴上静载力矩的 2.5 倍	绝缘等级：F 级 防护等级：电动机 IP54 制动座 IP22 冷却方式：IC410 或 IC411	用于要求双速的提升机构
YEZ	建筑起重机械用锥形转子制动三相异步电动机	机座号：100～160 功率：0.85～15kW 极数：4、4/6、4/8	基准工作制：单速 S4，25% 双速：高速 S4，40% 低速 S4，25% 单速：$T_{st}=(2.5\sim3.0)T_N$ 双速：高速 $T_{st}=(1.8\sim2.2)T_N$ 低速 $T_{st}=(1.9\sim2.2)T_N$ 静制动力矩： 单速 18～205N·m 双速 16～40N·m	绝缘等级：B 级 防护等级：IP44 冷却方式：IC411	用于建筑起重机需要自制动的场合
YBEZ、YBEZX	起重用隔爆型锥形转子制动三相异步电动机	机座号：11～51 功率：0.2～13kW 极数：4	基准工作制：S4，25% $T_M=(2.0\sim3.0)T_N$ $T_{st}=(2.0\sim3.0)T_N$ $n_{max}=2.0n_0$ 静制动力矩： 1.86～147.1N·m	绝缘等级：F 级 防护等级：电动机 IP44 或 IP54 接线盒 IP54 冷却方式：IC410 防爆级别：ⅡB、ⅡC 级	用于起升和运行机构
YZRSW	塔式起重机用涡流制动绕线转子双速三相异步电动机	机座号：225～280 功率：24～55kW 极数：4/8	基准工作制： 电动机高、低速 S3，40% 制动器 S3，15% 高、低速时 $T_M=2.8T_N$ $n_{max}=2.0n_0$ 额定制动力矩： 235～590N·m	绝缘等级：F、H 级 防护等级：电动机 IP44 接线盒 IP54 制动器 IP00 冷却方式：IC411	用于建筑机械需要自制动和调速的场合
YZTD	塔式起重机用多速三相异步电动机	机座号：112～250 功率：1.1～30kW 极数：4/8、4/12、4/16、4/6/24、4/8/32、2/4/16、2/4/22	基准工作制：高、中速 S3，40% 低速 S3，25% $T_M\geqslant1.8T_N$，$T_{st}\geqslant1.8T_N$ $n_{max}=3000r/min$ 制动力矩≥1.5 额定转矩	绝缘等级：F 级 防护等级：电动机 IP44 带有内通风 IP23 接线盒 IP54 冷却方式：IC411	用于塔式起重机及其他建筑机械
YG	辊道用三相异步电动机	机座号：112～225 功率：0.3～14kW 极数：4、6、8、10、12、16、20	基准工作制：S5，40% $T_M=2.5T_N$ 动态常数： 4 极：90～130kg·m²/h 6 极：205～820kg·m²/h 8 极：335～1540kg·m²/h 10 极：490～4050kg·m²/h 12 极：990～5710kg·m²/h 16 极：2500～9460kg·m²/h 20 极：9750～13300kg·m²/h	绝缘等级：F、H 级 防护等级：IP54 冷却方式：IC410	用于驱动冶金工业工作辊道的辊子

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

型号	产品名称	机座号、功率范围与极数	主要参数	结构特征	主要用途
YGP	辊道用变频调速三相异步电动机	机座号：112～400 功率：1.1～250kW 极数：4、6、8、10	基准工作制：S5，40%、S5，60% $T_M=(2.5\sim3.0)T_N$ 4 极，$n_{max}=2.0n_0$ 6、8、10 极，$n_{max}=2.5n_0$ 频率范围：5～100Hz	绝缘等级：F、H 级 防护等级：电动机 IP55 接线盒 IP55 冷却方式：IC410	用于驱动冶金工业需要调速的工作辊道的辊子

4　起重及冶金用三相感应电动机产品选型

起重及冶金用三相感应电动机适用于多种工作制，S1～S7 及 S9 工作制均会遇到，产品的选型直接影响电动机运行的可靠性，这里仅对几个主要问题做简要说明。

4.1　S1～S5 工作制的发热问题

当电动机被认定为以 S1 工作制运行时，其负载时间（见图 3.10-4 中 $t_1+t_2+t_3$）必须大于 3 倍发热时间常数 T_θ，使电动机的发热与散热接近平衡；当电动机被认定为以 S2 工作制运行时，其停止并断能的时间（见图 3.10-4 中的 t_p）应大于 3 倍电动机静止时散热时间常数 T_0（见图 3.10-5），使电动机的温度降低到接近环境温度。

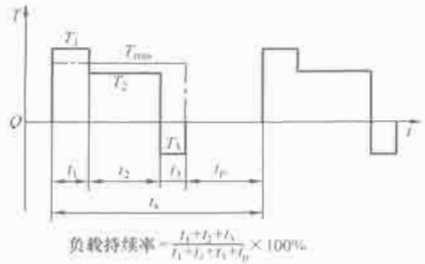


图 3.10-4　电动机的等效负载

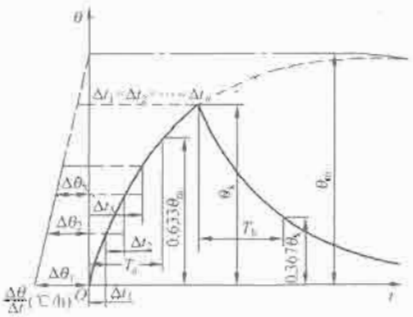


图 3.10-5　电动机的发热与散热时间常数

发热时间常数 T_θ 通常取电动机在额定负载下，从实际冷态运行到温升为 $0.633\theta_w$ 的时间；散热时间常数 T_0 通常取电动机在额定工况时热态（$\theta=\theta_k$）下，从停转并断能瞬间起到温升降到 $\theta=0.367\theta_k$ 的时间。

S3～S5 工作制时发热与散热状况介于 S1 与 S2 之间，其负载时间与停转并断能时间见表 3.10-2。

表 3.10-2　各工作制的负载与停转并断能时间

工作制	负载时间 $\sum t_1$	停转并断能时间 t_p
S1	$\geqslant 3T_\theta$	0
S2～S5	$<3T_\theta$	$>T_0$

4.2　工作周期 $t_s\neq10$min 时电动机的发热

对于断续周期工作制的电动机，按 IEC60034-1 及 GB 755 的规定，工作周期均为 10min，实际工作中往往不是 10min，平均温升相同，由于其发热曲线上峰值不同，对绝缘的寿命会产生不同的影响。当 $t_s>10$min 时，θ_{max} 会增大，值得注意的是，当 t_s 减小到一定程度时，由于起动损耗的影响，会引起 θ_{min} 的增加。所以当 t_s 离 10min 较远时，应考虑电动机认定为 S2 或 S4 工作制，如图 3.10-6 所示。

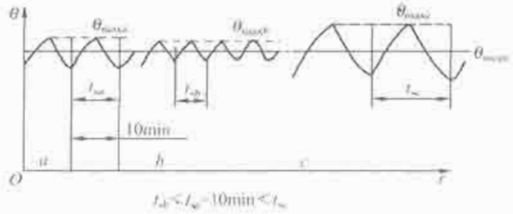


图 3.10-6　不同 t_s 时电动机的发热

4.3　S4 及 S5 工作制电动机功率的确定

起重及冶金用三相感应电动机的基准工作制大多规定为 S3 40%，但很多工况可划归为 S4 或 S5。为便于正确选型，制造厂往往需要提供有关曲线和表格。几个参数的确定方法如下：

1）负载持续率 ε。按图 3.10-4 确定负载持续率为

负载持续率 $\varepsilon=(t_1+t_2+t_3)/(t_1+t_2+t_3+t_p)\times100\%$，负载状况较复杂时必须进行等效处理。

2）起动等级 Z_s。对于 S4 及 S5 工作制，其工作状态可划分为点动（不超过 1/4 额定转速）、全起动、电制动及反转。按等效热损耗把各状态全部折算成全起动状态，这个等效的每小时全起动次数即为起动等级，用 Z 来表示

$$Z=Z_s+0.25Z_j+0.8Z_b+1.8Z_r$$

式中，Z_s 为每小时全起动次数，1/h；Z_j 为每小时点动操作次数，1/h；Z_b 为每小时电制动次数，1/h；Z_r 为每小时电制动并反转次数，1/h。

典型的起动等级划分见表 3.10-3。

表 3.10-3　起动等级划分

起动等级 Z	全起动次数 Z_s	点动次数 Z_j	电制动次数 Z_b	反转次数 Z_r	工作制类型
6	6	0	0	0	S3
	4	8	0	0	S3
150	150	0	0	0	S4
	100	200	0	0	S4
	80	0	80	0	S5
	65	130	65	0	S5
	30	160	30	30	S5
300	300	0	0	0	S4
	200	400	0	0	S4
	160	0	160	0	S5
	130	260	130	0	S5
	60	320	60	60	S5

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

起动等级 Z	全起动次数 Z_q	点动次数 Z_j	电制动次数 Z_b	反转次数 Z_f	工作制类型
600	600	0	0	0	S4
	400	800	0	0	S4
	320	0	320	0	S5
	260	520	260	0	S5
	120	840	120	120	S5

3）惯量增加率 C。负载惯量的大小直接影响电动机的起动、制动时间，对 S4 及 S5 工作制尤其显著，因此，选用电动机时必须首先确定负载惯量，再用惯量增加率折算起动等级，惯量增加率 C 按下式计算

$$C=(GD_M^2+GD_L^2)/GD_M^2$$

式中，GD_M^2 为电动机的飞轮转矩；GD_L^2 为负载的飞轮转矩。

当负载的 GD_L^2 确定后，可用 CZ 值代替 Z，从图 3.10-7 中查出所对应的输出功率比，确定电动机的输出功率值。

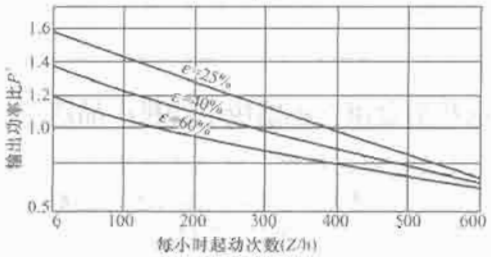


图 3.10-7 输出功率与起动次数的关系

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 11 章　潜水及潜油感应电动机

1　潜水电动机与潜水电泵概述

潜水电泵由潜水电动机与潜水电泵组装成机组，或由潜水电动机轴伸端直接装上泵部件组成机泵合一的产品，潜入井下水中或江、河、湖泊、海洋水中以及其他场合水中工作。具有体积小、重量轻、起动前不需引水，不受吸程限制，不需另设泵房，安装使用方便、性能可靠、效率较高、价格低廉、可节约投资等优点。广泛应用于从井下或江河、湖泊中取水，农业排灌，城市供水，工矿企业给排水、城乡建筑排水、居民生活用水、城市或工厂污水污物处理，饭店宾馆排污，纺织、印染、造纸、化工等行业浆料输送，养殖场输水排污，粪便处理，矿山给、排水，污水污物输送和盐场海水、卤水输送等多种场合使用。也可用于海上采油平台抽取海水进行冲洗、冷却与灭火，用于火力发电厂供水、增压，船舶供水，管道增压及海底矿物采集等特殊场合使用。

潜水电泵（潜水电机）有交流和直流二大类。其中直流潜水电泵只在一些特殊场合下使用，如用在舰船上或其他特殊场合。交流潜水电泵中，除正在发展的永磁转子电动机外，大量生产和广泛使用的是潜水感应电泵（以下简称潜水电泵）或潜水感应电动机（以下简称潜水电机）。

按电动机内部的不同结构型式，可将潜水电泵和潜水电动机分为充水式、充油式、屏蔽式和干式四种基本的结构型式，如图 3.11-1 所示；按泵与电机的配置方式，可分为外装式上泵型、外装式下泵型、内装式下泵型、半内装式下泵型和贯流型等几种，如图 3.11-2 所示。

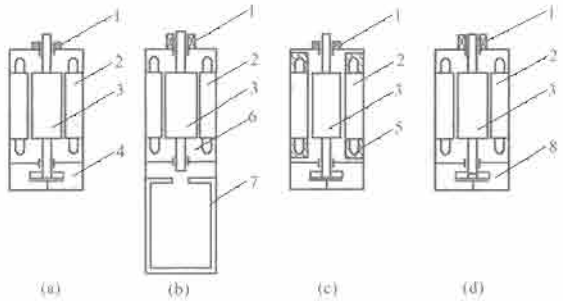


图 3.11-1　潜水电动机基本结构示意图
（a）充水式；（b）充油式；（c）屏蔽式；（d）干式
1—轴封装置；2—定子；3—转子；
4—水；5—树脂填充剂；6—绝缘
润滑油；7—保压装置；8—空气

我国潜水电泵产品的品种主要包括井用潜水电泵、小型潜水电泵（包括河流用潜水电泵、工程用潜水电泵等）、污水污物潜水电泵、矿用潜水电泵（包括矿用隔爆型和矿用一般型）、轴流潜水电泵、大型潜水电泵（包括矿、井用高压潜水电泵和一般用大型潜水电泵）以及海水用、盐场用潜水电泵等。

目前在不断开发潜水电动机和潜水电泵新产品的同时，要着重稳定与提高产品性能和使用可靠性、延长使用寿命。

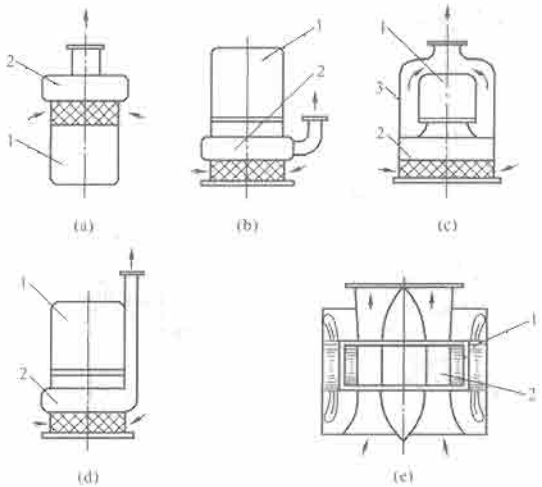


图 3.11-2　潜水电泵结构示意图
（a）外装式上泵型；（b）外装式下泵型；（c）内装式下泵型；
（d）半内装式下泵型；（e）贯流型
1—电动机；2—泵；3—外壳

2　潜水电动机的典型结构

2.1　充水式结构

电动机为充水密封式结构，典型结构如图 3.11-3 所示，内腔充满清水或防锈润滑液（防锈缓蚀剂）。各止口接合面用 O 形橡胶密封圈或密封胶密封。轴伸端装有甩砂环、橡胶油封或单端面机械密封等防砂，能防止电动机外部井液中的固体杂质和泥沙颗粒进入电动机内部。下部安装橡胶调压囊，用以调节内腔充水因温度或压力变化所引起的体积变化。电动机的定子（包括绕组）、转子和轴承均在水中工作。定子绕组采用以聚乙烯或聚氯乙烯等材料绝缘的耐水绕组线制造，具有良好的耐水绝缘性能和较长的使用寿命。电动机的上、下部装有水润滑滑动导轴承，轴下端装有水润滑推力轴承，用以承受电动机运行时的转子自重和水泵的轴向推力。为了限制水泵起动时转轴向上窜动，下部还装有上推力滑动轴承。图 3.11-3（a）为薄钢板卷焊机壳结构，轴伸端安装橡胶骨架油封或机械密封，适用于功率较小、铁心较短、机壳受力较小的电机。图 3.11-3（b）为钢管机壳结构，整体刚性较好，适用于功率较大、铁心较长、机壳受力较大的电动机。

充水式潜水电动机结构简单，从根本上解决了电动机潜入水下运行时产生的水渗漏问题。定子绕组、转子绕组和铁心直接浸在水中，冷却效果好、输出功率大；内腔充入清水，使用中对井水水质不会产生污染，符合卫生和环保要求。充水式电动机的绕组、铁心和轴承均在水中工作，对绕组所使用的导线及其加工工艺、接头材料及包扎工艺、水润滑轴承的结构、材料及加工工艺、铁心与金属材料的耐锈耐腐蚀处理等有很高的要求。充水式电动机的性能和可靠性直接取决于这几种关键部件的性能。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

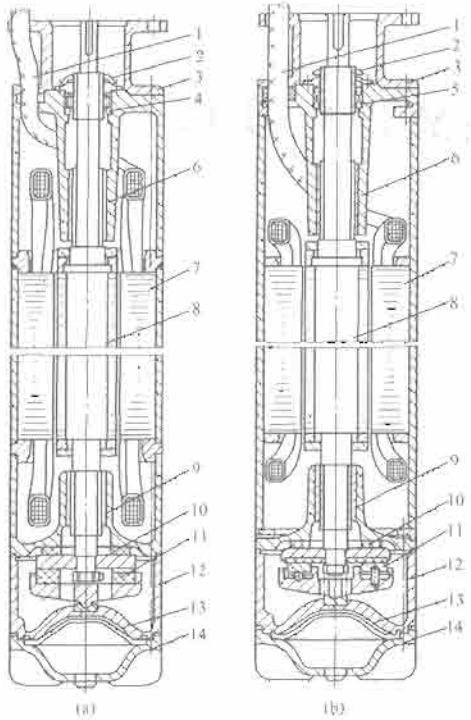


图 3.11-3 充水式井用潜水电动机结构
(a) 薄钢板卷焊机壳结构；(b) 钢管机壳结构
1—引出电缆；2—甩砂环；3—连接法兰；4—橡胶油封；
5—机械密封；6—上导轴承；7—定子；8—转子；
9—下导轴承；10—上推力轴承；11—推力轴承；
12—底座；13—橡胶调压囊；14—底脚

2.2 充油式结构

电机为充油密封结构，如图 3.11-4 所示，内腔充满变压器油或其他种类的绝缘润滑油。各止口配合部位均装有耐油橡胶 O 形圈或涂密封胶密封。轴伸端装有机械密封及甩砂环，用以防止井水和水中固体杂质进入电动机内腔，同时阻止电动机内所充的绝缘润滑油泄漏到机外。电动机的定子、转子和滚动轴承均在油中工作。电动机的定子绕组采用特殊的耐油绝缘结构，以保证充油式电动机能在井下水中恶劣的环境中可靠地工作。电动机下部装有保压装置，内设贫油信号装置。保压装置的主要作用是：调节电动机内腔所充油液因温度变化或压力变化所造成的体积变化，并维持电动机内腔油压略大于外部水压，阻止井水侵入电动机内部，以免造成定子绕组绝缘性能下降，从而影响电动机的运行可靠性。当电动机内腔所充油液因电动机长期运行正常泄漏或因机械密封故障等原因造成非正常泄漏导致电动机“贫油”时，信号装置就会向控制系统发出信号，使控制系统能及时断开电源。

充油式电动机的结构比充水式复杂，它的使用可靠性首先取决于轴伸端所安装的机械密封的性能和可靠性，同时取决于定子绕组绝缘结构的耐油水特性。当机械密封的泄漏量很小、抗磨性较好时，电动机定子绕组和轴承的工作条件得到较好的保证，电动机的运行可靠性和使用寿命相应得到提高。而当定子绕组绝缘结构具有一定的耐水性时，即使电动机内有少量的水进入，定子绕组仍能继续工作。

2.3 屏蔽式结构

井用屏蔽式潜水电动机如图 3.11-5 所示，由一密封的定子、在水中工作的转子、水润滑轴承和橡胶调压囊等组成。

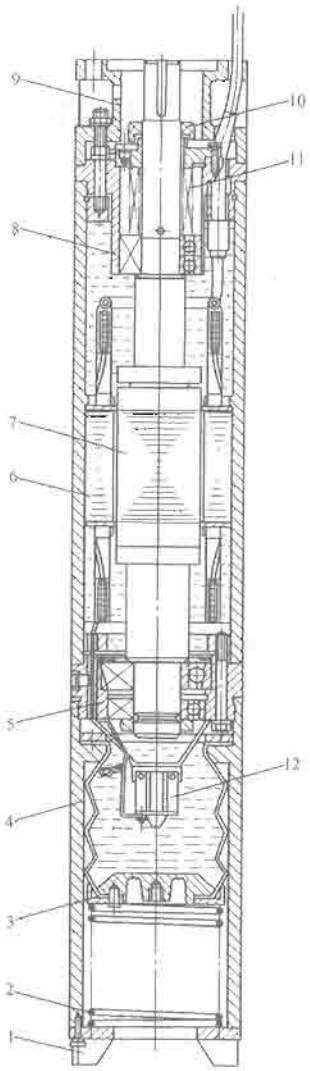


图 3.11-4 充油式井用潜水电动机典型结构
1—底座；2—油压弹簧；3—油囊；4—油囊护套；
5—下端盖；6—定子；7—转子；8—上端盖；
9—连接法兰；10—甩砂环；11—机械密封；
12—贫油触头装配

它的定子密封结构由机壳、非磁性不锈钢薄壁管或非磁性不锈钢薄板制作的屏蔽套和端环焊接后，成为一独立的密封腔，将定子铁心和绕组包封起来，内充环氧树脂或塑料填充物。转子腔内充满清水或防锈润滑液。电动机上、下部装有径向滑动导轴承，轴下端为轴向推力滑动轴承。轴伸端安装防砂密封装置，各止口结合面用 O 形橡胶密封圈或密封胶密封。

屏蔽式电动机的特点是，定子为一独立的密封腔，对导线绝缘的耐水性或耐油性要求降低，定子绕组可用普通漆包线制作。转子表面也可采用非磁性不锈钢材料封闭，以增加转子的耐腐蚀性能，转子腔允许进水，对轴伸端密封的防泄漏要求很低，一般只要求防止水中的砂粒和固体杂质进入电动机内腔。屏蔽式电动机的可靠性一般较高，但定子密封结构较复杂，非磁性不锈钢薄壁管和端环、机壳的制造、装配要求较高，修理较困难。

屏蔽式结构一般用于 100mm 及 150mm 井径的井用潜水电动机中。国内目前仅用于 100mm 机座的电动机中。

2.4 干式结构

电动机为干式密封结构，内腔充满空气，与普通陆用电动机相似。各止口接合面用 O 形橡胶密封圈或密封胶密封，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

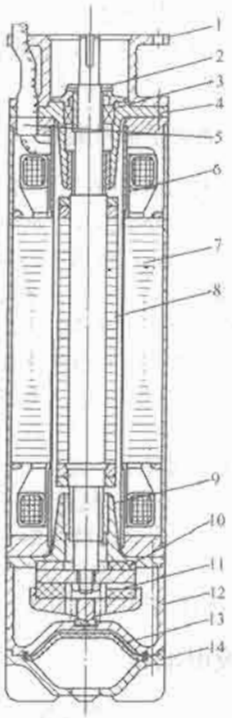


图 3.11-5　屏蔽式井用潜水电动机典型结构
1—连接法兰；2—甩砂环；3—防砂密封；4—上导轴承；
5—电缆引出装置；6—屏蔽套；7—定子；8—转子；
9—下导轴承；10—上推力轴承；11—推力轴承；
12—底座；13—橡胶调压囊；14—底脚

轴伸端安装机械密封来阻止水分和潮气进入电动机内腔，以保持电动机的正常运行状态。干式电动机结构简单、制造方便，但对轴伸端密封要求很高，基本上要求不出现渗漏，同时要求绕组绝缘具有优良的耐潮性能。轴伸端密封的性能和使用寿命直接影响干式电动机的可靠性。

3　主要零部件的结构和材料

3.1　定子绕组

充水式电动机的定子绕组一般采用 SQYN 型漆包铜导体聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线、SJYN 型绞合铜导体聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线、SV 型实心铜导体聚氯乙烯绝缘耐水绕组线、SJV 型绞合铜导体聚氯乙烯绝缘耐水绕组线和 SYJN 型实心铜导体交联聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线、SJYJN 绞合铜导体交联聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线或类似性能的其他型号耐水绝缘导线制成。这几种耐水绝缘导线具有较高的耐热性、良好的耐老化性能和较高的机械强度，绝缘可靠、使用寿命较长。在水中的长期工作温度对 SQYN 型和 SJYN 型聚乙烯绝缘耐水线及 SV 型和 SJV 型聚氯乙烯绝缘耐水线应不超过 70℃，对 SYJN 型和 SJYJN 型交联聚乙烯绝缘耐水线应不超过 90℃，并可承受 1MPa 的水压。

充油式潜水电动机的定子绕组采用加强绝缘的复合耐油、耐水漆包线或耐油性较好的漆包线绕制。

3.2　接头密封

充水式潜水电动机定子绕组的星形连接点、耐水绝缘导线与引出电缆的连接接头以及引出电缆与动力电缆的连接接头一般采用自黏性胶带作主密封层和主绝缘层，外加机械保护层进行包扎。要求包扎紧密、密封可靠、耐水绝缘性能良好。

为了防止充油式潜水电动机引出电缆外圆和芯线渗油，除用密封圈将电缆引出部位密封外，引出电缆与导线的内接头用环氧胶密封或用铜接头隔离密封。引出电缆与动力电缆的接头也牢固连接、严格密封，以保证接头的绝缘电阻，提高运行可靠性。

3.3　轴伸端密封

机械密封是充油式电动机和干式电动机的关键零部件，这与充水式电动机或屏蔽式电动机轴伸端所安装的机械密封在性能要求和所采用的结构型式上有很大的不同。

充油式电动机和干式电动机对机械密封的性能要求很高，要求机械密封能阻止井水及水中所含的固体杂质进入电动机内腔，同时能防止电动机内腔所充绝缘润滑油向外泄漏。在电动机运行过程中，要求机械密封摩擦副（动环与静环）磨损小、密封泄漏尽量减小。充水式电动机和屏蔽式电动机轴伸端安装的机械密封，用以防止井水中所含的砂粒杂质进入电动机内腔，对机械密封的性能要求较低。充油式电动机常用的机械密封结构如图 3.11-6 所示。

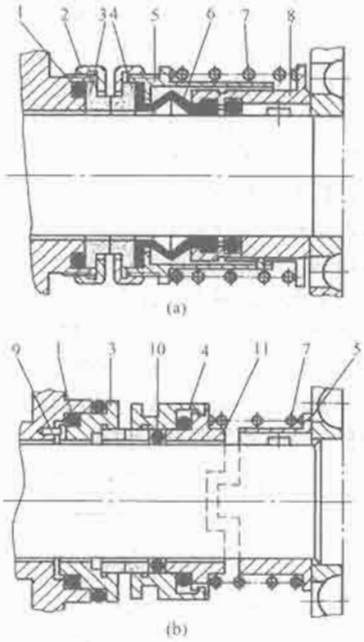


图 3.11-6　充油式电机机械密封结构
1、10—O 形圈；2—螺母；3—静磨块；4—动磨块；
5—传动套；6—波纹管；7—弹簧；8—传动座；
9—销；11—推块

充油式和干式潜水电动机机械密封常用的动、静密封环材料主要为碳化钨和碳化硅，也可采用氮化硅、氧化铝陶瓷、金属氧化铝陶瓷等材料，有的还采用石墨、塑料、金属和其他的有机合成材料等。

3.4　轴承

3.4.1　水润滑滑动轴承

分为水润滑滑动导轴承和水润滑推力滑动轴承两种。

水润滑导轴承摩擦磨损性能的优劣和承载力的大小，直接影响电机的使用可靠性和使用寿命。常采用自润滑性能优良、抗咬合性良好的铅青铜材料，用树脂浸渍或金属浸渍的烧结石墨材料，水润滑性能良好、耐磨性能好的热固性塑料或性能接近的其他材料制作的轴瓦与不锈钢淬硬轴套或镀铬

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

轴颈组成。轴瓦内孔冷却槽分为直槽或螺旋槽两种，如图3.11-7所示。

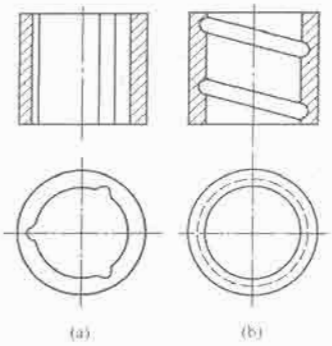


图3.11-7 水润滑导轴承冷却槽结构
(a) 直槽；(b) 螺旋槽

水润滑推力滑动轴承是以黏度很低的水作为润滑冷却剂，轴承承载面处于边界润滑状态。推力轴承与对磨圆盘的摩擦面润滑较差，要求轴承材料具有良好的自润滑性、耐磨性，较低的摩擦系数，承载力高，运转稳定，耐腐蚀性好。结构上应保证轴承的工作面能得到充分的冷却和良好的润滑。

常用的水润滑推力轴承有两种结构，如3.11-8（a）和图3.11-8（b）所示，一种是滑动工作表面分块、整体调心的"整体式轴承"；另一种是工作面分成几块独立调心的"分块调心式轴承"。整体式轴承常采用水润滑性能优良、耐磨性好、具有较低的摩擦系数、承载力高、运转稳定、耐腐蚀性好的热固性塑料压制或采用经金属或树脂浸渍的石墨材料制作，与不锈钢淬硬的圆盘配对；分块调心式轴承的扇形块用金属制作，常用的金属为铜合金，与充填纤维的塑料圆盘或其他高耐磨材料圆盘配对。整体式推力轴承制造简单、成本低廉，更换方便，但承载力相对较低；分块调心式轴承加工复杂，装配要求高，承载力高，使用寿命长，适合大功率电机配高扬程泵使用或特殊要求使用。

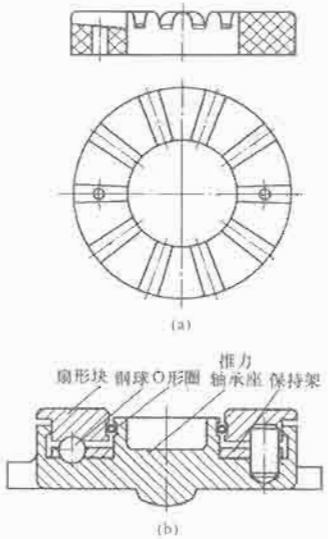


图3.11-8 水润滑推力轴承结构
(a) 整体式；(b) 分块调心式

3.4.2 滚动轴承

主要用于充油式和干式潜水电机，部分小功率充水式电机也有使用，用润滑油或润滑脂润滑。为了保证充油式或干式电动机机械密封工作的可靠性，要求转子轴向不产生窜动。为此，转子下部反向安装了两个不同尺寸的角接触球轴承，用螺母锁紧定位，使轴不能上、下窜动，以保证机械密封动、静磨块在运行中不致脱开，造成油的泄漏和水的渗漏，提高了电动机的使用可靠性，延长了使用寿命。

3.5 保压机构和贫油保护信号装置

井用充油式潜水电机运行时，为了防止井水侵入电动机内部，维持机内油压大于外部水压，同时调节因温度和压力变化造成的油液体积变化，在电机下部装有保压装置和贫油保护信号装置。电机总装注油后，弹簧处于压紧状态，油囊中储满了绝缘油。依靠弹簧在油囊中产生的压力维持机内油压。当保压装置正常工作时，只有绝缘油通过机械密封非常缓慢地外泄，而井水则不能反向渗入电机内腔。经过一定时间的正常运行或因密封故障等原因造成不正常的油泄漏，使电动机内油量的消耗达到规定限值时，电动机内部发生"贫油"。这时电动机内油压下降，机械密封内、外将产生油和水的交换，电动机进水，会造成绕组绝缘电阻下降，甚至出现短路、烧损等事故。此时贫油信号装置会发出贫油信号，使控制开关动作，自动切断电源，并发出警报。

4 井用潜水感应电动机

井用潜水电机的外径尺寸受到它所安装的井的直径的严格限制，电机很细长。在同一井径中使用的同机座号电动机功率的增加，仅依靠增加电动机的高度来达到。常用的井用潜水电动机有充水式和充油式两种，屏蔽式主要用于小机座号电动机中。井用潜水电动机的供电电压三相有高压6000V或3000V，低压380V或660V等几种，单相供电电压为220V。

1）YQS系列和YQS2系列充水式井用潜水三相感应电动机、YQSD系列充水式井用潜水单相感应电动机，总体结构如图3.11-3所示，主要规格见表3.11-1。

表3.11-1 井用潜水电动机规格表

机座号	最大外径 (mm)	同步转速 (r/min)	额定功率 (kW)
100	96	3000	0.37,0.55,0.75,1.1,1.5,2.2,3
150	143		3,4,5.5,7.5,9.2,11,13,15,18.5
175	168		3,4,5.5,7.5,9.2,11,13,15,18.5,22,25,30
200	184		4,5.5,7.5,9.2,11,13,15,18.5,22,25,30,37,45
250	233		11,13,15,18.5,22,25,30,37,45,55,63,75,90,100,110,125
300	281		37,45,55,63,75,90,110,125,140,160,185,220
350	330	1500	30,37,45,55,63,75,90,100,110,125,140,160
400	377		90,100,110,125,140,160,185,220

2）YQSY系列充油式井用潜水三相感应电动机、YQSYD系列充油式井用潜水单相感应电动机，总体结构如图3.11-4所示，主要规格见表3.11-1。机械密封典型结构如图3.11-6所示。

3）YQSP系列屏蔽式井用潜水三相感应电动机、YQSPD系列屏蔽式井用潜水单相感应电动机，总体结构如图3.11-5所示，主要规格见表3.11-1中100和150机座号各规格。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

5　小型潜水电泵

5.1　充油式潜水电泵

QY 型充油式潜水电泵为上泵型，其典型结构如图3.11-9所示。上部为泵，下部为立式笼型三相或单相感应电动机，在电机与泵结合部安装一套整体式双端面机械密封。电机内部充满 N5～N10 号机械油或绝缘性能与润滑性能相同的其他油液，定子与端盖及出线盒的各止口配合面均装有耐油橡胶()形密封圈。这种结构使电机长期潜入水中时，可保证其定子绕组和轴承能在充满绝缘润滑油的良好环境条件下工作。

整体式双端面机械密封盒由二道机械密封组成，密封环端面压力由弹簧压力产生。第一道密封由一对高硬度的耐磨材料，如氧化铝陶瓷或氮化硅等材料制作的密封环组成，用以防止机内油液外泄和机外水侵入，同时阻止机外水质中所含杂质颗粒的侵入。第二道密封则由不锈钢、铸铁、石墨或塑料等密封环配对组成，用以阻止机外水与机内油液的交换。

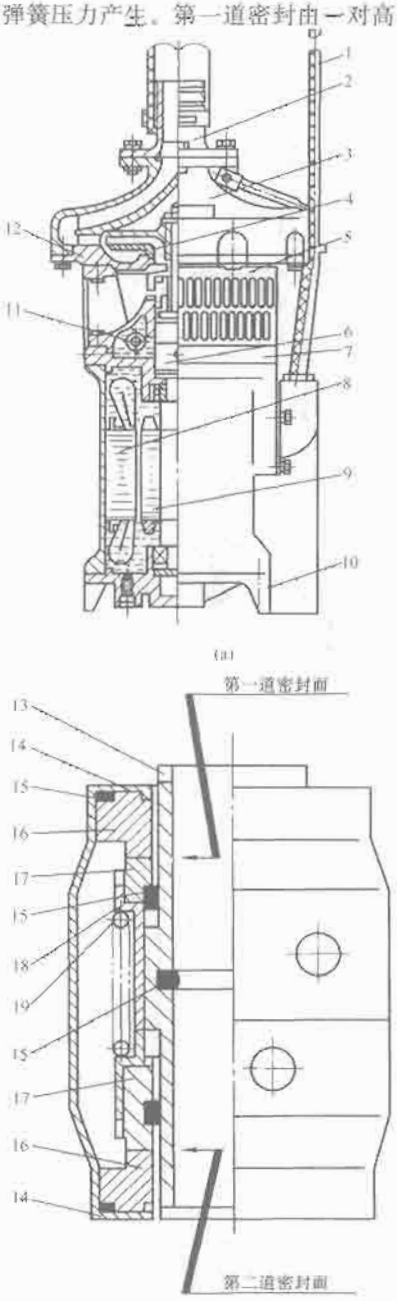


图 3.11-9　上泵型充油式潜水电泵与整体式机械密封结构

(a) 总体结构；(b) 密封盒结构

1—电缆；2—管接头；3—泵体；4—叶轮；5—进水节；6—机械密封盒；7—上端盖；8—定子；9—转子；10—下端盖；11—橡胶扩张件；12—泵盖；13—轴套；14—密封盒；15—()形圈；16—静密封环；17—动密封环；18—支座；19—弹簧

5.2　充水式潜水电泵

充水式潜水电泵的电机结构有两种：一种是以水润滑导轴承和推力轴承支承的结构；另一种是滚动轴承支承的结构。

5.2.1　水润滑轴承支承结构

电机结构与井用充水式潜水电机类似，特性也相似。

5.2.2　滚动轴承支承结构

QS 型充水式潜水电泵是其典型结构，如图 3.11-10 所示。上泵型，上部为泵，下部为充水式立式笼型感应电动机，内部充满清水。定子绕组一般采用 SQYN 型漆包铜导体聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线或 SV 型实心铜导体聚氯乙烯绝缘耐水绕组线制成。滚动轴承用不易水解的润滑脂润滑，两边加橡胶骨架油封或单端面机械密封进行密封，以阻止水进入滚动轴承密封腔内。定子冲片与定子铁心、转子表面采用耐水涂料进行防锈耐腐蚀处理。金属零部件表面采用防锈涂料处理或进行电镀处理，以防止水对金属的腐蚀。

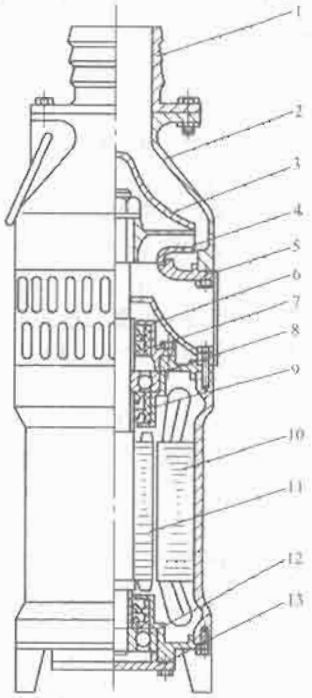


图 3.11-10　滚动轴承支承的充水式潜水电泵典型结构

1—管接头；2—泵体；3—泵盖；4—叶轮；5—泵座；6—上轴承盖；7—油封（三处）；8—轴承（二处）；9—上端盖；10—定子；11—转子；12—底座；13—下轴承盖

5.3　干式潜水电泵

由干式电动机和泵组合而成，一般设计成下泵型结构，用以尽量抽干需排出之水，也有少量做成上泵型结构，用于排水或灌溉。Q 型干式三相潜水电泵为典型的上泵型结构，QX 型为下泵型三相潜水电泵，QDX 型为下泵型单相潜水电泵。

5.4　主要规格和参数

不同系列、不同结构的充水式、充油式和干式三相及单相潜水电泵的主要规格与参数范围见表 3.11-2。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3.11-2 潜水电泵的主要规格与参数范围

名 称	型 号	电压（V）	功率（kW）	流量（m^3/h）	扬 程（m）	
					单 级	多 级
充油式潜水电泵	QY	380	0.75～11	6～250	3～53	～130
干式潜水电泵	Q	380	0.75～11	6～250	3～53	～130
充水式潜水电泵	QS	380	0.75～11	6～250	3～53	～130
单相潜水电泵	QDX	220	0.12～0.75	1.5～40	3.5～24	—
下泵式潜水电泵	QX	380	0.55～11	3～250	4.5～60	～130
污水污物潜水电泵	QW，WQ	220，380	0.25～315	3～7000	5～50	
	WQH，WQZ	380，6000	1.1～1400	220～43350	1.4～12.5	
矿用潜水电泵	BQW，BQS	1140，660，380	0.55～250	3～1000	5～200	
潜水螺杆泵	QGD	220	0.25～0.75	0.8～3.2	50～100	
	QG	380	0.37～7.5	1.2～30	50～120	
轴流潜水电泵	ZQ，QZ	380，6000	4～280	200～11000	1.6～10.35	
大型潜水电泵	QKSG	6000	220～1900	≤1450	≤530	
	QKSD	380，660	≤355	≤1450	≤300	

6 污水污物潜水电泵

6.1 污水用与颗粒污物用潜水电泵

用于输送一般污水和含颗粒污物的污水。污水污物潜水电泵的结构分为外装式、内装式、半内装式和干式几种。

6.1.1 外装式潜水电泵

由位于电泵上部的干式笼型潜水感应电动机和下部的潜水泵组合而成，典型结构如图 3.11-11（a）所示。有的结构在泵叶轮前部装有搅拌叶轮，能将较大块的污物搅碎。电动机装有热保护器，其热元件紧靠绕组的上端部，电流元件串接在绕组中。当潜水电泵运行中因各种原因产生过载或电源断相时，热保护器可自动切断电源，保护潜水电泵不致因故障而损坏。电机功率较大时，在绕组中埋置 PTC 热敏电阻对绕组温度进行监控。当绕组温度因各种原因升高达允许极限时，PTC 热敏电阻阻值急剧升高，通过保护器切断电源，使潜水电泵绕组得到保护。

外装式潜水电泵运行时，水从吸入口经过泵体从出水管直接流出，并未经过机座表面。排水过程中，位于上部的机壳露出水面时，电机处在空气冷却状态，散热条件大大恶化。为了改善干式外装式潜水电泵的冷却条件，常将功率较大的电机的机座做成夹套式，将部分液体引入机座夹套中冷却电机。当机壳露出水面时，冷却效果仍较好。

6.1.2 内装式潜水电泵

内装式结构与外装式潜水电泵基本相同，典型结构如图 3.11-11（b）所示。内装式潜水电泵的机座、上端盖和下端盖均做成夹层，输送的液体经过环形夹层冷却电动机表面。当电泵的外壳长期露出水面运行时，内装式结构冷却条件较好，绕组温升较低，电动机不易因过热产生故障。

6.1.3 半内装式潜水电泵

半内装式潜水电泵也是一种下泵型潜水电泵，它的冷却结构和冷却效果介于外装式与内装式之间。半内装式潜水电泵的总体结构与外装式类似，所不同的是，半内装式潜水电泵的泵出水管经过电动机机壳向上的部分与电动机机壳连成一体，液体流经电动机机壳的部分表面向上流动，对电动机起一定的冷却作用。当电动机露出水面工作时，其散热条件优于无夹套的外装式潜水电泵。

6.1.4 干式潜水电泵

干式潜水电泵的可靠性与充油式潜水电泵相似，主要取决于机械密封和静密封件的性能以及电动机定子绕组绝缘处理的好坏。密封性能可靠，外部水不渗入或少渗入电机内

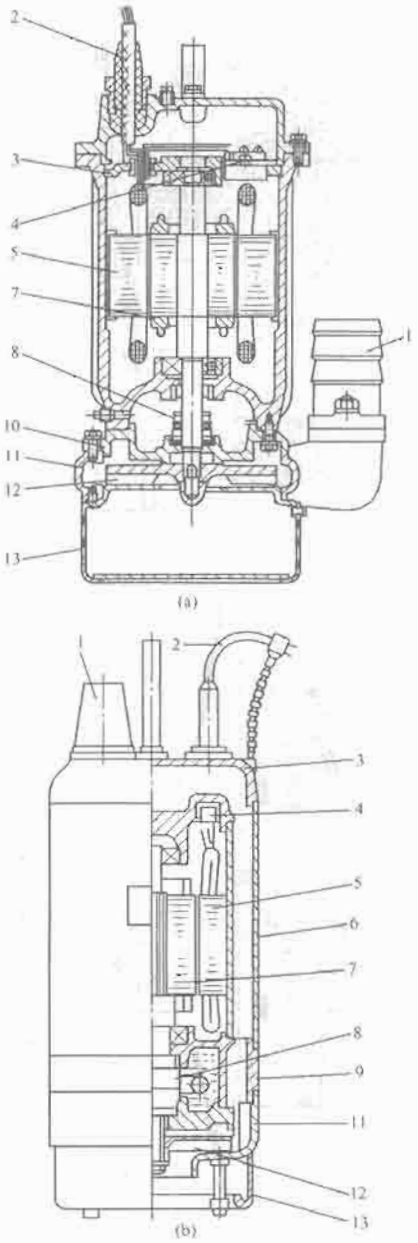


图 3.11-11 污水污物潜水电泵典型结构

（a）外装式；（b）内装式

1—管接头；2—电缆；3—上端盖；4—热保护器；5—定子；6—机壳；7—转子；8—机械密封；9—下端盖；10—油室座；11—泵体；12—叶轮；13—滤网

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

部，电机的整体性能就可靠、寿命较长。干式潜水电泵潜入水下运行，电动机内腔的湿度很高，容易产生凝露，绕组绝缘防潮处理的好坏也直接影响运行可靠性和使用寿命。

6.2　纤维污物用潜水电泵

用于输送含纤维性污物的污水，其基本结构与输送含颗粒污物用潜水电泵类似，只是在叶轮前方加有切削刀刃，将进入泵的长纤维切断成短纤维，以防缠绕叶轮，方便输送。

6.3　主要规格和参数

QW 型和 WQ 型污水污物潜水电泵的主要规格和参数见表 3.11-2。

7　潜水螺杆泵

潜水螺杆泵由上部的螺杆泵与下部的潜水电机连成一体，用于小流量、高扬程的输水場合。电动机的结构型式有充水式、充油式和干式三种。泵的定子材料为天然橡胶或丁腈橡胶，转子材料为 40Cr 镀铬或 45 钢（优质碳素结构钢）镀铬。

潜水螺杆泵的结构如图 3.11-12 所示，主要规格和参数见表 3.11-2。

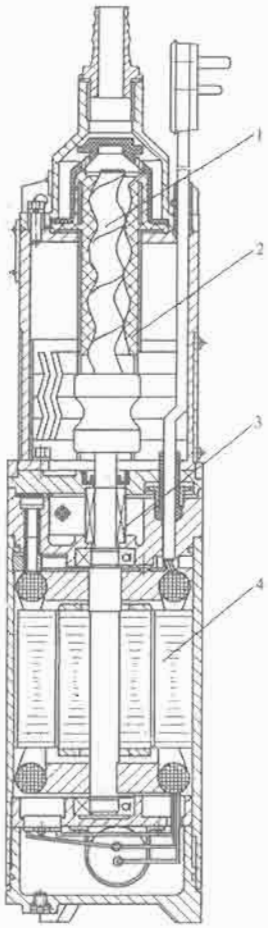


图 3.11-12　潜水螺杆泵结构
1—螺杆；2—橡胶定子；3—机械密封；4—电机

8　矿用潜水电泵

矿用潜水电泵有两种基本类型：一种是适合煤矿井下含有爆炸性气体的环境中使用的防爆潜水电泵，其结构有隔爆型和本质安全型等；另一种是用于非爆炸性环境的矿用一般型。

矿用隔爆型潜水电泵基本上是由干式污水污物潜水电泵或充水式潜水电泵做成隔爆结构，电动机各止口面和端盖轴孔均做成隔爆结构，还增加了隔爆接线板及相应的隔爆结构。矿用隔爆型潜水电泵结构如图 3.11-13 所示。

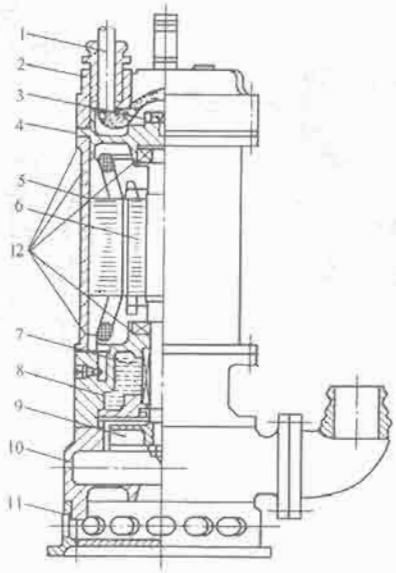


图 3.11-13　矿用隔爆型潜水电泵典型结构
1—电缆；2—上端盖；3—接线板；4—上轴承盖；5—定子；6—转子；7—机械密封；8—下端盖；9—叶轮；10—泵体；11—泵座；12—隔爆接合面

矿用一般型的结构与污水污物潜水电泵或小型潜水电泵的结构基本相同。

矿用潜水电泵的主要规格和参数见表 3.11-2。

9　轴流潜水电泵

9.1　贯流式轴流潜水电泵

贯流式轴流潜水电泵的典型结构如图 3.11-14（a）所示。这种电泵的结构比较特殊，外径大而扁平的充水式潜水电机位于电泵的外部，轴流泵位于电动机的内部。叶轮与电机转子成为一体，立式安装的轴流泵的上部出水导叶和下部吸入导管与电动机的上、下端盖分别连成一体。整个电泵转子的重量由安装在导叶内的一组滚动轴承承担。包括绕组在内的电动机各零部件直接浸在水中，水流从下向上经过转子内腔。轴承室内部充满润滑油脂，并通过密封与外部水隔开。

贯流式轴流潜水电泵结构简单，轴向高度低，基本上不存在密封技术问题，但对使用水质要求较高，如水中含有泥砂，会直接影响使用寿命和运行可靠性。贯流式电泵适合于双向排水或安装在闸门上使用。

9.2　灯泡式轴流潜水电泵

典型结构如图 3.11-14（b）所示。电机位于轴流泵的上方，电机转子与叶轮同轴。电机为干式结构，轴伸端安装一套机械密封及辅助密封，防止外部的污水和固体杂质进入电机内腔。机内装有进水检测装置及绕组温度保护装置。当因各种原因导致电机内部进水时，电机下部的进水检测装置会发出信号，控制系统将电源切断，并发出故障警报。另外，当绕组温度超限时，绕组内的温度传感器发出信号，使温度保护装置动作，将电源切断，并发出故障警报。从而防止或减少电机的损坏，确保安全、可靠运行。

灯泡式轴流潜水电泵的效率较高，对环境水温和水质的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

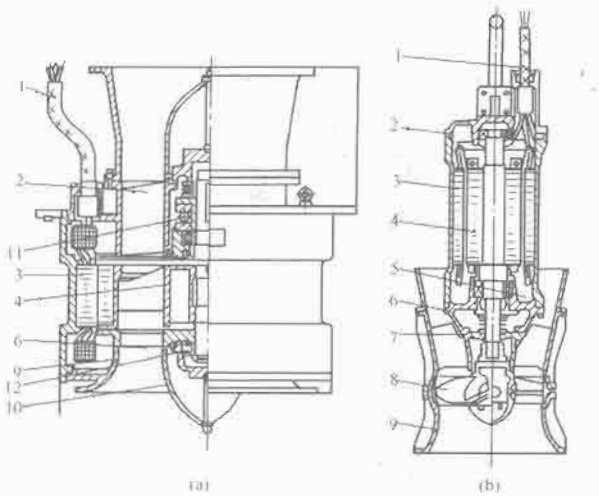


图 3.11-14 轴流潜水电泵典型结构
(a) 贯流式；(b) 灯泡式
1—电缆；2—上端盖或导叶；3—定子；4—转子；5—进水检测装置；6—下端盖或吸入导叶；7—机械密封；8—叶轮；9—吸入导管；10—导水锥；11—上轴承；12—下轴承

适应性较广，适合多种用途使用。

9.3 主要规格和参数

ZQ型或QZ型轴流潜水电泵的主要规格和参数见表3.11-2。

10 大型潜水电泵

10.1 结构与主要特点

大型潜水电泵由大型高压（或低压）潜水感应电动机与潜水泵直接连接组成一体，用于矿山排水和江河湖泊取水等。大型潜水电泵主要分为矿井用和河流用两种。安装方式有立式和卧式。泵的吸入方式分为单吸式和双吸式两种。

大型潜水电泵的电机结构主要分为两种：一种是矿、井用大型潜水电泵的细长型立式结构，主要是充水式；另一种是外径尺寸不受限制的立式结构或卧式结构，电机可制成干式、充水式或充油式几种。

10.1.1 QKSG型和QKSD型双吸式大型潜水电泵

其结构如图3.11-15（a）所示。电动机为充水密封式结构，与充水式井用潜水电动机结构类似。定子绕组采用聚氯乙烯绝缘高压耐水绝缘导线或交联聚乙烯绝缘尼龙护套高压耐水绝缘导线制作，它们的最高使用温度分别为65℃和90℃。耐水绝缘导线相互间的连接及耐水绝缘导线与引出电缆之间的连接，采用丁基自粘性胶带或性能接近的其他胶带进行包扎，作为耐水主绝缘层；外面再用机械强度较高的塑料胶粘带或塑料带进行包扎，作为机械保护层。水润滑导轴承由石墨浸渍金属材料制作的轴瓦和镀铬轴套或不锈钢淬硬轴套组成，轴瓦上的冷却润滑槽一般为螺旋槽。水润滑推力轴承结构为分块调心式，一般有16块扇形轴瓦，每块均可自动调整，使轴承滑动面形成楔型水膜。推力轴承材料为石墨浸渍金属材料，配对材料为不锈钢制作并淬硬的圆盘。上推力轴承结构为整体式。泵有上、下两个吸入口，两组泵叶轮对称分布，所产生的两个轴向推力方向相反，相互平衡。这样，电机下部的水润滑推力轴承只承受电动机转子和水泵转动部分的重量，而不需承受水泵运行时产生的轴向水推力，轴向载荷大大减小，轴承运行条件好转，磨损量减小，寿命延长，电泵运行的总体可靠性也相应得到提高，使用寿命延长。

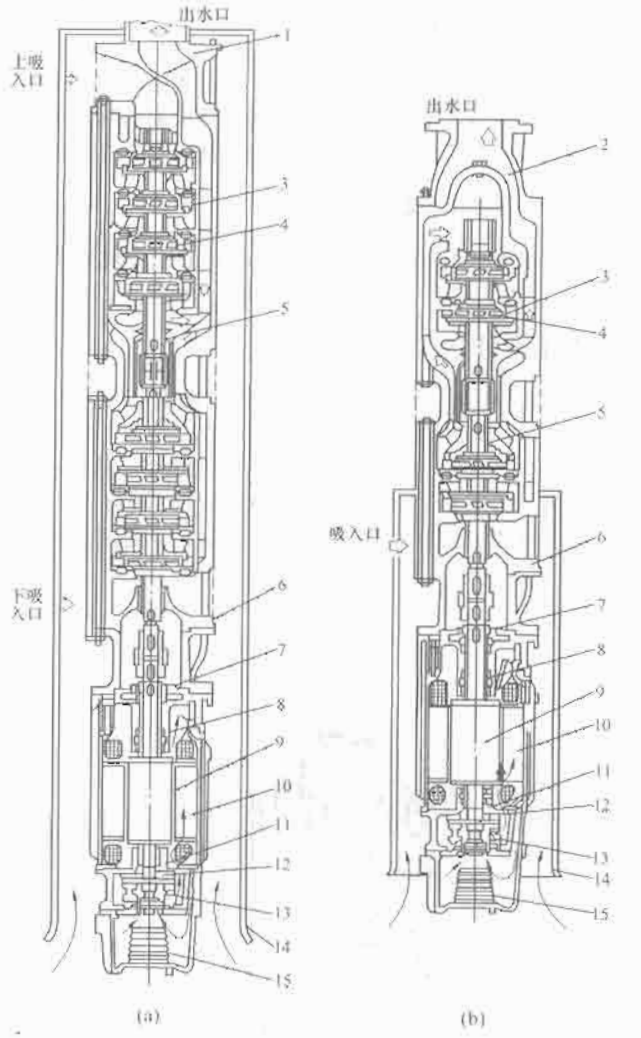


图 3.11-15 大型潜水电泵典型结构
(a) 双吸式；(b) 单吸自动平衡式
1—吸入吐出体；2—出水壳；3—导叶；4—叶轮；5—泵轴；6—下吸入体；7—甩砂环；8—上导轴承；9—转子；10—定子；11—下导轴承；12—上推力轴承；13—推力轴承；14—吸水罩；15—调压囊

10.1.2 QKSG-D型单吸自动平衡式大型潜水电泵

结构如图3.11-15（b）所示。电动机结构与双吸式结构相同，泵只有下部一个进水口，叶轮同样分成对称的两组。水从吸入口经过下部第一组叶轮流出，再从第二组叶轮的泵壳侧面流道到达位于电泵上部的第二组叶轮吸入口，然后经过第二组叶轮到达电泵的出水口。水流经过两组叶轮所产生的轴向推力正好相反，互相抵消，自动平衡，达到了双吸式结构同样的目的。

10.2 主要规格和参数

大型潜水电泵的主要规格和参数见表3.11-2。

11 潜水电泵的选择与使用

11.1 潜水电泵的选用

目前生产的潜水电泵有井用潜水电泵、小型潜水电泵、污水污物潜水电泵、矿用隔爆型潜水电泵、轴流潜水电泵和

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

高压潜水电泵等几大类、多种型号规格，可适于不同使用条件的需要。在购买潜水电泵前，应根据使用的具体条件，尤其是使用的水质及所需的流量大小、扬程高低来选择合适的电泵。

11.1.1　不同类型潜水电泵的选用

当用于抽吸井中的地下水或向高处或远距离输水时，可选用井用潜水电泵。

用于河流、湖泊等场所取水，一般为清水水质，可优先选用 QY 型充油式、Q 型干式和 QS 型充水式等上泵型潜水电泵；要求流量较大时，可选用轴流潜水电泵。

用于局部区域排水，水质中含有小颗粒固体杂质，如防汛排涝、建筑施工、养殖场净化、工矿企业排水等场合，选用 QX 型、QDX 型等下泵型潜水电泵较合适。

当用于输送含有固体颗粒和污物、短纤维等的污水、泥浆或砂浆，尤其是含有大颗粒污物的污水时，应选用 QW 型、WQ 型等污水污物潜水电泵。

用于输送含纤维性污物、尤其是长纤维污物的污水时，应选用泵叶轮前方加有切削刀刃、能将进入泵的长纤维切断成短纤维，防止纤维缠绕叶轮的纤维污物用潜水电泵。如用普通的污水污物潜水电泵输送含有长纤维的污物，会造成长纤维缠绕叶轮，使电机堵转，从而造成定子绕组损坏。

当用于煤矿等矿区采掘面用来输送含有污物、煤粉、泥砂和石块等固体颗粒的污水时，必须选用具有防爆性能的矿用隔爆型潜污水电泵，切勿使用一般的潜水电泵或污水污物潜水电泵，以免产生爆炸危险。

11.1.2　选用合适规格的潜水电泵

不同规格的潜水电泵有不同的使用范围。潜水电泵铭牌上所规定的流量和扬程是这台潜水电泵使用的额定点，一般也是使用效率较高的最佳点。使用中流量和扬程发生变化，电机的输出功率相应发生改变，直接影响到电机绕组的发热。对潜水电泵使用的经济性和可靠性有较大的影响。当使用的扬程过低（对离心式或混流式水泵）或过高（对轴流式水泵）时，电机绕组会过热。如果电泵长时间过载运行，绕组发热厉害，往往会烧坏电动机。潜水电泵一般可以在 0.7 倍到 1.2 倍额定流量范围内（污水污物潜水电泵一般可以在 0.7 倍到 1.3 倍额定流量范围内）正常运行，超出此范围，可能会产生过载。因此，用户在选择和使用潜水电泵时，必须考虑合适的使用范围。尤其是对于多级的井用潜水电泵或高扬程的潜水电泵，不要用于过低的扬程，以免既浪费电能，又可能损坏潜水电泵。

11.2　潜水电泵的使用与维护

（1）使用前的准备与检查

1）使用前检查定子绕组冷态绝缘电阻，其值一般不低于 50～100MΩ。当其值低于 1MΩ 时，应检查原因，排除故障后才能使用。

2）电泵应可靠接地，并安装专用保护开关或规格相符的过载保护开关。

3）使用前，应对电动机内部或密封油室进行检查，是否按要求充满了油（对充油式和干式潜水电泵）、清水或规定的水溶液（对充水式或屏蔽式潜水电泵）。

4）检查电泵的转向。

（2）定期检查与维护

定期检查定子绕组绝缘电阻值，对电泵的运行情况进行经常的监视，检查机械密封渗漏情况，定期进行修理或更换。

12　井用潜油感应电动机

井用潜油感应电动机是一种专用立式三相两极笼型感应电机，它与多级离心泵组成潜油电泵，潜入 1000～3000m 或更深的油井中，连续可靠地抽取含腐蚀性物质的高温高压原油或井液。与其他型式的机械采油装置相比，潜油电泵具有排量大、效率高等优点，可适用于强力抽取高产井、水淹井中的液体，以及用于深井和斜井采油。

12.1　结构特点与关键零部件

12.1.1　总体结构

电机为充油密封结构（见图 3.11-16）。定子铁心分为若干段，各段间用黄铜冲片隔开，转子由若干个具有独立笼型绕组的铁心和一根空心长轴组成。各段铁心间装有中间支撑滑动轴承，滑动轴承的青铜轴套固定在轴上，钢轴瓦固定在定子黄铜冲片的内圆上。电动机上、下部装有滑动导轴承。机壳用无缝钢管制成。电机下部装有离心式叶轮和过滤器，使内部油液循环、过滤，以冷却电机，改善轴承的润滑和冷

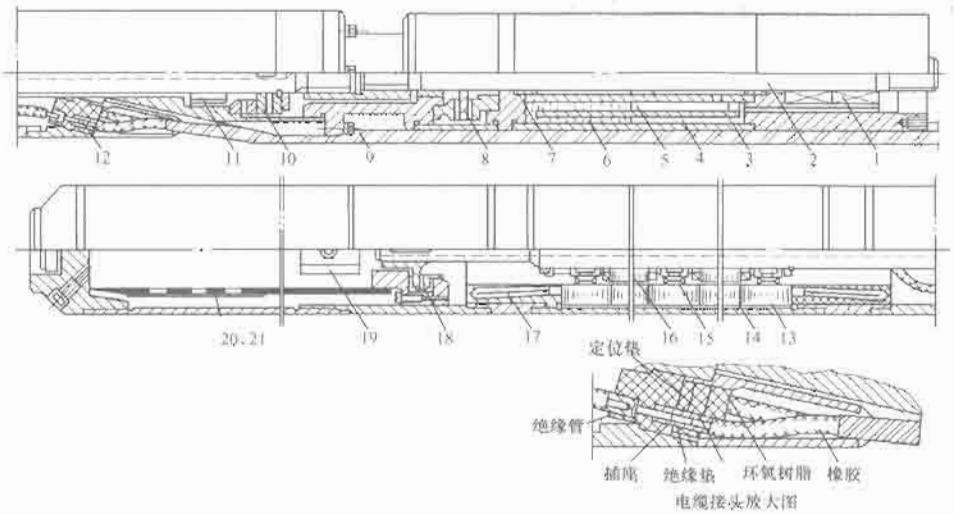


图 3.11-16　井用潜油感应电动机（带保护器）结构

1—机械密封；2—保护器轴；3—呼吸管；4—渗入的井液；5—电机内腔油液；6—氟油；7、11、15—径向滑动轴承；8、10—推力轴承；9—电缆；12—电缆接头；13—黄铜冲片；14—硅钢冲片；16—转子；17—定子绕组；18—泵叶轮；19—磁铁；20—过滤筒；21—过滤网

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

却条件。

12.1.2 定子绕组

定子绕组的导线绝缘由涂氟46塑料作黏结剂的聚酰亚胺薄膜（FHF薄膜或HF薄膜）在裸铜线上半叠包2～3层后烧结成型。每相绕组由一根导线连续穿线、槽绝缘采用聚酰亚胺-氟46玻璃布复合材料。定子绕组线与引出线的接头以及绕组星形连接点分别用氟46带绕包平整后，半叠包两层FHF薄膜，外包一层HF薄膜，然后在高温下烧结、密封成型，以保证其具有足够的电气强度和耐油、耐水性能。

定子绕组穿线、连接及端部整形、绑扎完成后，用环氧树脂真空加压浇注、固化成型，使其成为连续密封的整体绝缘系统。

电机绕组的绝缘等级分为B、F、H三级，绕组的允许工作温度分别为120℃、140℃和160℃。

12.1.3 电缆引出装置

电流通过挠性铠装电缆引入，经过泵和保护器的一段为扁电缆，扁电缆线芯与电机的连接采用插接结构，如图3.11-16所示。电缆采用聚丙烯、乙丙橡胶、交联聚乙烯、聚酰亚胺-氟46复合薄膜/乙丙橡胶组合绝缘或聚酰亚胺-氟46复合薄膜/可溶性聚四氟乙烯组合绝缘作为主绝缘层，外包护套再用耐腐蚀金属带进行铠装。

12.1.4 保护器

保护器的结构型式主要分连通式、沉淀式、胶囊式和补偿式四种。其主要作用是阻止井液侵入电机内部，并使电机内油液外泄量减少到最小，使电机能在井下长期可靠地运行而不必重新充油；由于电机起动、运行和停机等原因而使机内油液的体积和压力发生变化时，能起相应的调节作用。

常用的连通式保护器的密封作用主要由其上端所装的2～3道端面机械密封来实现，导向管、呼吸弯管和氟油等用来调节各油室油液的体积变化，并阻止从机械密封渗入的井液继续进入电机内部。

12.1.5 控制保护装置

由地面控制器和井下信号装置组成。其作用是对电机安装位置的井液压力进行监视和读数，以保证油井的合理工作；对系统的对地绝缘电阻进行检测，并能在绝缘电阻过低时切断电源，防止故障扩大；对电机进行短路保护、单相运转保护、三相过电流保护和欠载停机或欠载停机延时自动起动，从而减少系统故障，提高运行可靠性，延长使用寿命。

12.2 主要规格和技术参数

潜油电机的外径尺寸受到油井套管内径尺寸的严格限制，电机呈细长型，其长度随功率的增加而增长，可从几米到几十米。为了制造方便，单级电机的长度小于10m。对于大功率电机采用多级串联连接方式，按所需功率大小分别制成上节电机、通用节电机和下节电机。额定电流相同的电机可以串接，电机功率为多级电机功率之和，电压为多级电机电压之和。潜油电机的电压随功率不同而改变，使用时需配用专用的三相油浸式变压器，将电网电压变换到电机所需的电压。

YQY型潜油电机的基本规格见表3.11-3。当电机功率大于单级最大功率时，即由两级或多级电机串联起来。

表3.11-3 潜油电机额定功率

潜油电机系列	单节潜油电机功率（kW）	串接潜油电机功率（kW）
107	10，12.5，15，17.5，20，22.5，25，27.5，30，32.5，35，37.5，40，42.5，45，47.5，50，55，60，65，75	按单节潜油电机任意组合，但最大功率为150
114	20，25，30，35，40，45，50，55，60，65，70，75，85	按单节潜油电机任意组合，但最大功率为170
138	25，30，35，40，45，50，55，60，65，75，85，90，95，105，115，120	按单节潜油电机任意组合，但最大功率为240

潜油电泵适用的油井套管尺寸、最大轴向投影尺寸和电机外径尺寸见表3.11-4。其所适用的环境温度有50℃、90℃、120℃和150℃等几个温度等级。

表3.11-4 潜油电泵有关尺寸

适用套管尺寸（mm）（in）	电泵最大轴向投影尺寸（mm）	电动机外径尺寸（mm）
127（5）	106	98
139.7（$5\frac{1}{2}$）	114，119	107，114
177.8（7）	149	138

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 12 章　其他派生及专用三相感应电动机

1　电磁调速感应电动机

电磁调速感应电动机由于具有结构简单、操作维护方便、运行可靠等特点，因而被广泛地应用于化工、纺织、造纸、水泥、印刷和制糖等行业要求恒转矩调速和风机、水泵等递减转矩调速的负载机械。

1.1　结构

YCT 系列电磁调速感应电动机由拖动电机借助凸缘端盖固定在离合器的机座上而成为一个整体，其典型结构图如图 3.12-1 所示。

电磁离合器的基本结构件为电枢和磁极两部分。

1）电枢为圆筒形整体钢体，直接固定在拖动电动机的输出轴上，由于电枢采用悬臂式结构，其支承面应具有足够的刚度，以免在电磁离合器励磁时，在单边磁拉力的作用下产生变形。同时，为了加强散热，电枢表面应有风叶和散热筋。

2）磁极有凸极、爪极和感应子等不同型式，如图 3.12-2 所示。一般爪极式适用于 100kW 以下的电磁离合器；感应子式磁极的结构较为简单，但材料的利用率较差，一般应用于小功率或爪极式结构受到限制的场合；凸极式磁极性能好，但结构复杂，一般适用于大型电磁离合器。

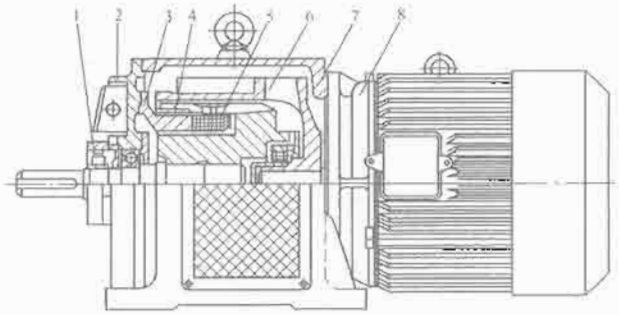


图 3.12-1　电磁调速感应电动机

1—测速发电机；2—端盖；3—托架；4—磁极；5—励磁绕组；6—电枢；7—机座；8—拖动电动机

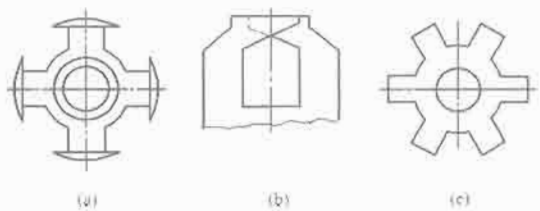


图 3.12-2　磁极结构示意图

(a) 凸极式；(b) 爪极式；(c) 感应子式

1.2　工作原理

当电磁离合器的励磁绕组中通以直流励磁电流时，沿气隙圆周方向的各爪极将形成若干对 N、S 极性交替的磁极，其磁路如图 3.12-3 中虚线所示。拖动电动机通电后，其输出轴直接驱动电枢旋转，从而在电枢中产生感应电动势并产生涡流，其涡流与气隙磁通相互作用，产生转矩，使磁极转子沿同一方向旋转，但其转速恒低于电枢转速。改变励磁电流的大小，便可以改变电磁离合器的输出转矩和转速。励磁电流越大，输出转矩越大，在负载转矩恒定时，转速也越高，从而可进行交流无级调速。

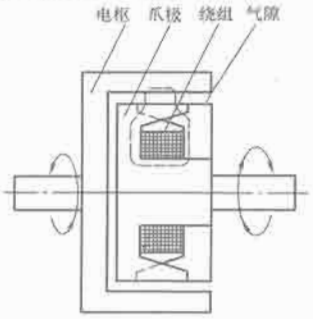


图 3.12-3　电磁离合器工作原理图

1.3　提高电动机性能的措施

对于一般工业驱动用中小功率的电磁调速感应电动机，大多采用实心电枢，其端部效应很大。尽管在设计中采取了一些措施，但端部系数一般在 1.4～1.6 之间，即电枢端部的等效阻抗为电枢轴向有效长度阻抗的 40%～60%。由此可见，由气隙中转换至电枢中的能量有相当一部分消耗于实心电枢的端部之中，从而影响了电磁调速感应电动机的性能（比如输出功率和输出最高转速等）。

采用低电阻端环电枢可以降低电枢的端部效应，提高电磁离合器的性能。所谓低电阻端环电枢，即在实心电枢的端面用低电阻率的材料，如铜或铝进行复合，制成接触电阻小、机械强度高的异性材料端环。另外，采用铜-铁合金材料铸成的电枢，效果也很好。

低电阻端环电枢的端部效应系数一般约为 1.1～1.2，也就是说，在相同的气隙能量情况下，低电阻端环电枢的能量利用率将大为提高，电机的输出功率和输出最高转速也会相应得到提高，一般功率可提高 1～2 级，输出的最高转速也同时得到提高。国内的 YCTD 系列低电阻端环电磁调速感应电动机的性能，已达到了较高的水平。

对于低电阻端环电枢的端部效应系数 K_e，可按下式进行估算

$$K_e = \frac{1}{1-\dfrac{2\tau_p}{\pi l_a}\dfrac{1}{\dfrac{\rho_1}{\rho_2}\tanh\dfrac{\pi l_d}{\tau_p}+\coth\dfrac{\pi l_d}{2\tau_p}}}$$

式中，τ_p 为极距；l_a 为电枢长度；l_d 为端环长度；ρ_1、ρ_2 为电枢和端环材料的电阻率。

2　机械减速感应电动机

机械减速感应电动机由一般用途的感应电动机和机械减速装置两部分组成。常用的机械减速感应电动机有齿轮减速感应电动机和摆线针轮减速感应电动机等。机械减速感应电动机主要用于驱动冶金、矿山、化工、食品、造纸、橡胶等机械，尤其适用于要求直接低速驱动的场合。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.1 齿轮减速感应电动机

齿轮减速感应电动机的减速装置采用外啮合渐开线圆柱齿轮，可正反两个方向传递功率。根据减速性能的要求，分为1级、2级、3级传递方式。

齿轮减速电动机的动力源是基本系列一般用途三相感应电动机。由于齿轮采用润滑油润滑，要求所有连接处不漏油、不渗油。因此，配套用电动机的凸缘止口外圆和端面的尺寸公差、形位公差精度比一般用途电动机制要提高一级。凸缘和轴伸尺寸根据输入功率的大小和传动级别来确定，可以不采用电动机通用标准的规定。齿轮减速电动机2级、3级转动结构如图3.12-4所示，常用的型谱和主要传动参数见表3.12-1。

表3.12-1 齿轮减速电动机常用型谱和主要传动参数

机座号	减速比范围	输出转速范围 (r/min)	输出转矩范围 (N·m)	基本规格数
71	2.38～6.45	587～217	8.8～94	45
80	2.48～6.36	571～223	64～154	34
100	2.27～6.36	617～220	114～331	18
112	2.35～6.36	613～226	224～251	9
132	7.5～62	196～23	27～299	83
160	7.07～95.7	208～14	173～627	44
180	76.3～104.3	194～14.4	346～862	19
200	5.3～90.7	276～14	457～1177	24
225	12.94～93.6	114～14.6	1129～1831	21
250	21.95～89.8	67～13.8	1841～2585	10
280	35～72.6	42～12.6	2517～3206	8

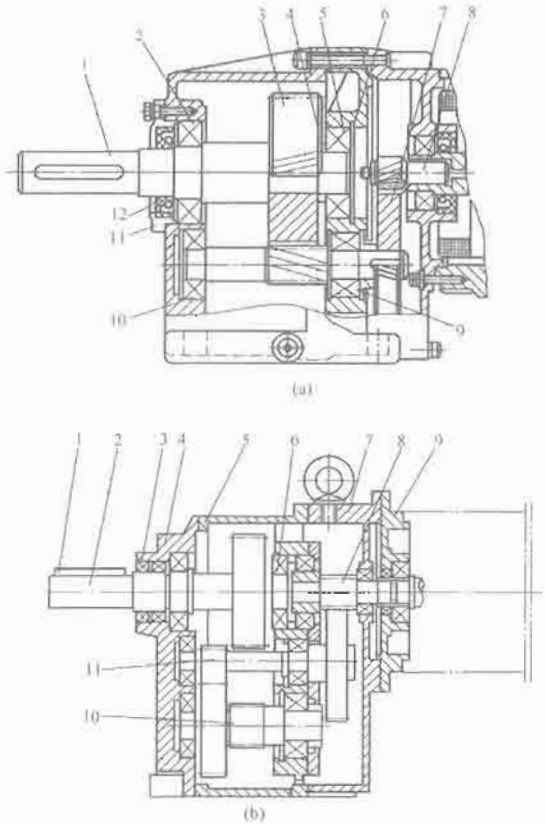


图3.12-4 齿轮减速电动机传动结构

(a) 二级传动

1—减速器输出轴；2、5、9—轴承；3—齿轮；4—垫圈；6—挡圈；7、8—齿轮；10—转轴齿轮；11—轴承盖；12—油封

(b) 三级传动

1—键；2—减速器输出轴；3—密封件；4—前箱盖；5—箱体；6—轴承；7—后箱盖；8、10、11—齿轮；9—电动机

2.2 摆线针轮减速电动机

摆线针轮减速电动机是由摆线针轮减速装置与一般用途感应电动机直接或通过其他连接部件耦合而组成的一个整体。它与其他的机械减速电动机相比，具有减速比大（1级减速比就可达87）、传动效率高、噪声低、体积小、质量轻等特点，但对针轮和针齿等传动零部件加工要求高，制造成本也相应较高。

摆线针轮传动是一种摆线齿轮与针轮啮合的减速传动。摆线齿轮齿廓呈短幅外摆线的等距曲线，齿数为 z。固定内齿轮为针轮，它由针齿壳装上针齿销与针齿套组成，其齿数为 $z+1$。在输入轴上固定互成180°对称的双偏心套，偏心套上装有转臂轴承。当输入轴带着偏心套旋转时，摆线齿轮和针轮上的齿依次对应啮合。由于摆线齿轮比针轮少一齿，所以输入轴转一周时，摆线齿轮向相反方向转一齿，低速自转运动，即转了 $1/z$ 周，这时传动比 $i=z$。这一减速运动传给输出轴是通过安装在输出轴上带有柱销套的销轴插入摆线齿轮相应孔中来实现的。此孔的直径比柱销套大两倍偏心距。摆线针轮减速装置典型结构如图3.12-5所示。

摆线针轮减速电动机的单级减速传动比有9、11、17、23、29、35、43、59、71、87共10种。输入功率范围为0.18～22kW，输出转矩范围为35～4700N·m。

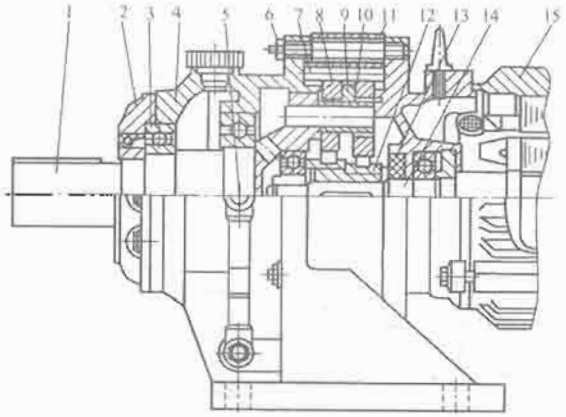


图3.12-5 摆线针轮减速结构

1—输出轴；2—轴承盖；3—轴承；4—外端盖；5—油表；6—柱销；7—针齿销；8—摆线齿轮；9—垫圈；10—内滚柱；11—针齿壳；12—偏心套；13—垫圈；14—输入轴；15—电动机

3 自制动感应电动机

自制动感应电动机是一种自身带有制动机构的电动机。它广泛应用于要求快速停止、准确定位、往复运动、频繁起动、防止滑行的各种机械中作主轴传动和辅助传动，如用于升降、运输、包装、食品加工、印刷、建筑、木工、冶金、锻压等机械。

自制动感应电动机有多种结构型式，常用的有电磁制动感应电动机、锥形转子制动感应电动机和盘式制动感应电动机。

3.1 电磁制动感应电动机

1）性能特点。电磁制动感应电动机是在Y系列(IP44)电动机的后端盖与风扇之间附加了一个圆盘型的直流电磁制动器而组成的派生系列产品。机座号与转速及功率的对应关系和基本系列一致，安装尺寸与基本系列相同，但

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

轴向外形尺寸稍有加长。电磁制动感应电动机具有制动迅速、定位准确、安全可靠、结构简单、使用方便、维护容易等特点。

2）结构特点与运行原理。电磁制动感应电动机结构如图 3.12-6 所示。电动机定、转子与 Y 系列的通用，附加电磁铁由直流励磁。当电动机接通三相电源，制动器同时工作，由于电磁吸力作用电磁铁 7 吸引衔铁 6，并压缩弹簧 9，使圆形制动盘 5 与端盖 3 和衔铁 6 相脱离，电动机在电磁转矩作用下开始转动。当切断电源时，电磁铁励磁线圈同时断电，制动器电磁吸力消失，衔铁 6 在制动弹簧 9 的推动下压紧摩擦制动盘，在摩擦力矩的作用下，电动机立即停止转动。电动机处在停电制动状态，如果需要改变一下转子的位置，可借助于制动器上的人工释放装置来实现，也可接通励磁线圈电源予以电气释放。

3）制动电动机电源接法和制动时间特性。制动时间特性与整流装置的电源接线有关，励磁线圈断电开关设置在交流侧，衔铁释放时间长；断电开关设置在直流侧，衔铁释放时间短。用户可根据使用要求进行选择。

4）制动器气隙的调整。制动器的摩擦材料经长时期使用后，将受到磨损，使电磁铁心与衔铁间的气隙增大，并且弹簧工作长度增加，从而使弹簧压力降低，制动力矩减小，同时气隙的加大，使衔铁吸合工作电压升高，严重时将使衔铁不能吸合，因此，使用时需经常核查气隙并进行调整。

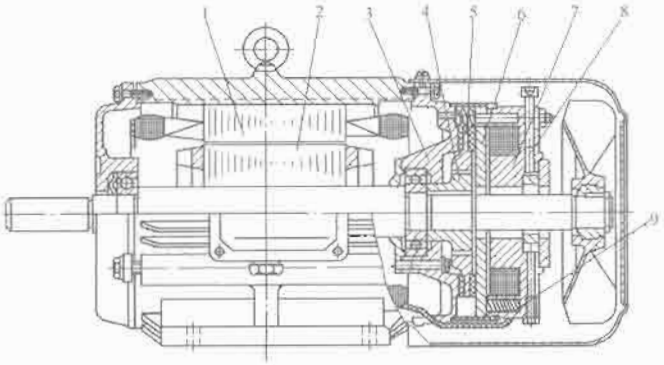


图 3.12-6　电磁制动感应电动机结构

1—定子；2—转子；3—端盖；4—齿套；5—制动盘；6—衔铁；7—电磁铁；8—释放螺钉；9—弹簧

3.2　锥形转子制动感应电动机

3.2.1　锥形转子制动笼型感应电动机

锥形转子制动笼型感应电动机具有结构牢固、制动可靠、过载能力强，以及维修、调整方便等特点。它适用于电动葫芦起升或其他要求有较大制动转矩的机械装置的驱动。

锥形转子制动笼型感应电动机与一般电动机的主要区别在于其定子内圆和转子外圆均为锥形，如图 3.12-7 所示。当电动机通电时，作用于转子上的磁拉力 F 可分解为径向力 F_1 和轴向力 F_2，在轴向力 F_2 的作用下，电动机转子会产生轴向位移，压紧压缩弹簧，松开风扇制动轮，并开始运转。当电动机断电时，轴向力 F_2 消失，风扇制动轮在弹簧力的作用下产生制动力矩，使电动机停止运转。电动机设有定位器，可调节风扇制动轮的运行间隙，对 3kW 及以上的电动机还另设有调节螺盘，供组装时调节定、转子间气隙用。

锥形转子制动笼型感应电动机一般无底脚，在传动端的端盖上有大、小凸缘，安装平面在传动端侧，端盖上可设安

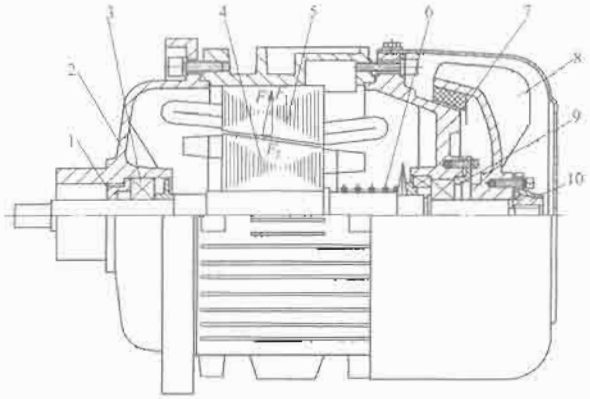


图 3.12-7　锥形转子制动笼型感应电动机结构

1—垫圈；2—前端盖；3—轴承；4—转子；5—定子；6—压缩弹簧；7—后端盖；8—风扇制动轮；9—调节螺盘；10—定位器

装轴承的轴颈，电动机应采用允许轴向窜动的联轴器或直齿轮传动，也可以由电动机轴伸采用矩形键联结。

电动机采用以 10min 为一个周期的断续周期性工作方式，其基准负载持续率为 25%。四极的功率（kW）等级为 0.2、0.4、0.8、1.5、3.0、4.5、7.5、13。需要其他负载持续率下的功率可按下式估算

$$P_t = P_N\sqrt{\frac{\varepsilon_N}{\varepsilon}}$$

式中，P_t 为实际负载持续率时的功率；ε_N 为基准负载持续率（25%）；ε 为实际负载持续率；P_N 为额定功率。

3.2.2　锥形转子制动绕线转子感应电动机

锥形转子制动绕线转子感应电动机除具有锥形转子制动笼型感应电动机的特点，即电机与机械式制动器合为一体，电动机的定子绕组具有产生转矩和不需另配电源就能使制动器适时打开的双重功能外，尤为突出的是锥形转子制动绕线转子感应电动机的转子绕组，可以通过集电环串入适当的电阻，使其机械特性人为地随意变软，与被驱动设备的特性相匹配，使起动制动平稳，起动电流小，起动转矩大。

锥形转子制动绕线型感应电动机机座号有 100、112、125、140、160、180、200、225 共 8 种，分 2、4、6 极和双速 4/2、8/2 极，工作方式有 S1、S2、S3、S4 等，负载持续率有 15%、25%、40%、60%、100% 等多种。四极 S1 时功率为 1.6～30kW，安装方式有 B3、B5、B6、B7、B8、V1、V3、V5、V6 等多种。电动机部分防护等级为 IP54，制动器部分为 IP20。

3.3　盘式制动感应电动机

盘式制动感应电动机是一种定、转子铁心呈圆盘形而槽沿径向辐射方向，气隙和穿过气隙的磁通方向是轴向的三相感应电动机。这种感应电动机是利用轴向磁吸力来产生制动力矩，与传统的圆柱（锥）形转子制动电动机相比，具有制动力矩大、制动迅速、定位准确等优点，并且结构简单、轴向长度短、耗用的硅钢片较少。盘式制动感应电动机适用于要求频繁起动、紧急停止、准确定位的各类机械。例如，用于电动葫芦、车床滑块、印刷机械、搬运机械、自动包装机械等需要经常起动和制动的场合。

1）结构特点。盘式制动感应电动机由盘型定子、盘型转子、制动块、弹簧和前后端盖等主要部件所组成。定、转子盘型铁心叠片用硅钢带在自动冲卷机上冲制而成。要求冲槽分度在 15μm 以内，冲槽步距随铁心卷直径自动进行调整，并带料冲槽后自动连续卷成圆形。卷绕后的铁心槽形呈

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

辐射状，分布在气隙一侧的端面，定子槽内嵌放绕组，绕组的端部置于盘形铁心的内圆和外圆侧。定、转子间的气隙在空间也呈圆盘形，气隙及通过气隙的磁通方向是轴向，气隙长度可以调整。转子为笼型，笼条呈轮辐状。在非轴伸端端盖处的内侧固定有制动块（摩擦副），轴上套有弹簧。

当电动机通电时，由轴向磁通产生吸力，使转子脱离制动块，压迫弹簧使气隙长度缩短，在异步转矩作用下转子开始旋转。断电后，轴向吸力消失，在弹簧作用下，转子移向制动块而制动。对同等功率电动机，其制动转矩比锥形转子制动式和旁磁制动式的大。

盘式制动电动机适用于要求频繁起动、紧急停止、防止惰行、准确定位的各类机械，作为主传动或辅助传动用。例如，用于电动葫芦、车床滑块、吊篮、印刷机械、木工机械、升降机、搬运机械、卷扬机等，其结构如图 3.12-8 所示。

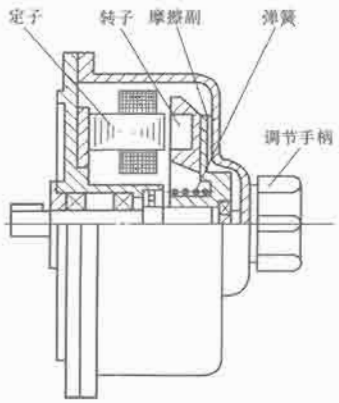


图 3.12-8 盘式制动感应电动机结构

2）主要技术数据。盘式制动感应电动机的主要技术参数如表 3.12-2 所示。

表 3.12-2 盘式制动感应电动机技术参数

功率（W）	电压（V）	频率（Hz）	工作制	转速（r/min）	额定电流（A）	效率（%）	功率因数	堵转电流（倍）	堵转转矩（倍）	最大转矩（倍）	制动转矩（N·m）	转动惯量（kg·m²）	弹簧工作力（N）	磁拉力（N）
100	380	50	S1	1340	0.28	70	0.75	5	1.8	2.0	1.8	0.035		
200	380	50	S1	1340	0.58	70	0.75	5	1.8	2.0	3.43	0.035		
400	380	50	S1	1380	1.24	70	0.70	5	1.8	2.0	6.86	0.04	303.8	780
500	380	50	S1	1380	1.45	75	0.70	5	1.8	2.0	6.86	0.04		
750	380	50	S1	1400	2.11	75	0.72	5	2.0	2.5	12.25	0.137		
500	380	50	S2-60min	1350	1.62	70	0.67	5	1.8	2.0	6.86	0.04	303.8	891
750	380	50	S2-60min	1280	2.23	70	0.70	5	1.8	2.2	6.86	0.04	303.8	1200
1100	380	50	S2-30min	1430	2.94	76	0.75	5	2.0	2.5	12.25	0.137		

4 高转差率感应电动机

高转差率感应电动机具有堵转电流小、堵转转矩大、转差率高和机械特性软等特点。适用于驱动转动惯量大和不均匀冲击负载，以及反转次数多的工作机械。

4.1 额定功率与工作制

高转差率电动机的额定工作方式为断续周期工作制（S3），负载持续率可为 15%、25%、40%和 60%四种。在保证电机温升合格的条件下，在不同负载持续率时，电机具有不同的允许最大输出功率，以供用户选用。对于不同功率和极数的电机，选取某一负载持续率下的允许最大输出功率作为电动机的额定功率，其他负载持续率下的电动机输出功率为软性的功率等级。高转差率感应电动机的额定功率的等级与基本系列三相感应电动机的功率等级相同。就四极电机而言，小功率高转差率电机取 60%负载持续率下的电机允许最大输出功率为电机额定功率，而随着功率的增加，额定功率时的电机负载持续率将下降，取为 40%，对较大功率电机则取 25%。

4.2 设计特点

提高电动机转差率的方法是增加转子电阻。高转差率电动机的转差率范围一般控制在 7%～13%。其主要设计特点如下：

1）转子导电材料。采用电阻率较高的，且铸铝工艺性较好的导电材料，如采用在 15℃时电阻率为（0.07～0.08）×$10^{-6}\Omega\cdot m$ 的铝合金材料。

2）转子槽形。由于高转差率电机的转子电阻比基本系列电机的大得多，转子槽形应适当缩小。考虑到模具制造和铸铝工艺等要求，转子槽形优先采用梯形槽、圆底槽和凸形槽，同时为了增加转子导条与端环连接处的机械强度，在铸铝转子两端可采用 5mm 长的大槽形冲片的办法。

5 低振动低噪声感应电动机

低振动低噪声感应电动机主要用于精密机床、低噪声风机以及在电动机轴伸上直接安装切削刀具而对振动要求很高的高精度平面磨床等精密机械。

5.1 主要技术指标

低振动低噪声感应电动机的设计和制造，通常是在一般用途电动机的基础上，采用必要的措施以达到低振动和低噪声的目的。比如 YZC 系列低振动噪声感应电动机就是在 Y 系列（IP44）电动机的基础上派生的产品，故其功率等级、安装尺寸、电气性能等主要技术指标与 Y 系列（IP44）电动机相同。YZC 系列低振动低噪声感应电动机的空载噪声和振动限值见表 3.12-3 和表 3.12-4。根据配套主机的不同要求，YZC 系列电动机的振动和噪声等级的组合见表 3.12-5。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3.12-3　YZC 系列电动机振动限值

机座号	80～132	160	80～132	160
极数	2		4、6、8	
振动等级	振动速度（有效值）(mm/s)			
S	0.71	1.12	0.45	0.71
R	1.12	1.8	0.71	1.12
N	1.8	2.8	1.8	1.8

表 3.12-4　YZC 系列电动机噪声限值
（A 计权声功率级）

功率 (kW)	同步转速 (r/min)											
	3000			1500			1000			750		
	噪声等级 (dB)											
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
0.55	—	—	—	47	51	56	—	—	—	—	—	—
0.75	61	66	71	47	51	56	47	51	56	—	—	—
1.1	61	66	71	52	56	61	47	51	56	—	—	—
1.5	65	70	75	53	57	62	53	57	62	—	—	—
2.2	65	70	75	56	60	65	53	57	62	52	56	61
3.0	69	74	79	56	60	65	57	61	66	52	56	61
4.0	69	74	79	59	63	68	57	61	66	55	59	64
5.5	73	78	83	61	65	70	57	61	66	55	59	64
7.5	73	78	83	62	66	71	60	64	69	58	62	67
11	77	82	87	66	70	75	61	65	70	—	—	—
15	77	82	87	68	72	77	—	—	—	—	—	—
18.5	77	82	87	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 3.12-5　YZC 系列电动机的振动和噪声等级组合

组　别	振动等级	噪声等级
1	S	Ⅱ
2	R	Ⅱ
3	S	Ⅲ
4	R	Ⅲ
5	N	Ⅰ
6	N	Ⅰ

5.2　设计特点

1）提高零部件的加工精度。主要提高轴承内圆与轴的配合精度、轴承外圆与端盖轴承室的配合精度，以及机座与端盖配合的止口精度。常用的公差配合见表 3.12-6。另外，对主要零部件的形位公差比一般用途电动机的提高 1～2 级。

表 3.12-6　YZC 系列电动机配合精度

零部件名称	零部件部位	公差配合
轴	轴承档	k6 或 k5
机座	止口	H8 或 H7
端盖	止口	js7 或 js6
	轴承室内圆	H6 或其他相当配合公差

2）提高转子平衡精度。先将风扇校静平衡后安装在转子上，然后转子校动平衡。同时其平衡精度比一般用途电动机的提高 1～2 级。

3）选用轴承精度为 E 级及以上的低噪声级轴承。

4）机座、端盖等支撑零件进行退火处理，转轴毛坯进行正火处理，以消除内应力，保证加工精度。

5）选择合适的气隙长度、转子槽斜度以及定、转子槽数，以降低电磁噪声。

6）选择合理的通风元件。对两极电动机在保证电机温升的前提下尽量采用叶片宽、直径小的外风扇。对噪声要求很高的电动机，在电动机风罩端安装消声元件。

6　振动电动机

6.1　用途及分类

振动电动机是把激振源和动力源有机地结合成一体，使之成为振动机械中一种结构紧凑，体积小，质量轻，激振效率高，寿命长，运行稳定，控制性能好，安装、调整、维修简便，通用性很强的独立基础件。它广泛用于矿山、冶金、煤炭、化工、机械、电力、建材、运输、粮食、食品、医学等各个部门。振动电动机可单机使用，也可多机组合使用，加上不同安装位置可产生圆形、椭圆、直线以及复合的多种运动轨迹，用来完成多种不同的工艺过程，或提高某些机器的工作效率。例如，用来选矿、选煤或粉粒固体物料分格的振动筛，铸件翻砂用振动填砂机，振动落砂机，防闭塞用振动放料斗，金属零件抛光用振动研磨机，颗粒固体物料装卸，运输用的槽式振动送料机，螺旋振动垂直提升机，振动干燥机，振动粉碎机，含毒物料密闭传输用的管状振动运料机，建筑用振动夯土机等。

振动电动机种类较多，按偏心块调节分为普通型停机调节和运转中可调两种。偏心块可安装在单轴伸上，也可安装在双轴伸上。按调速方式可分为变频、变压和变极调速。按电源可分为三相和单相、工频和中频。按安装型式可分为卧式和立式。

6.2　设计特点

普通型振动电动机典型结构如图 3.12-9 所示，运转时由双轴伸上分别安装在固定和可调偏心块来产生激振力。

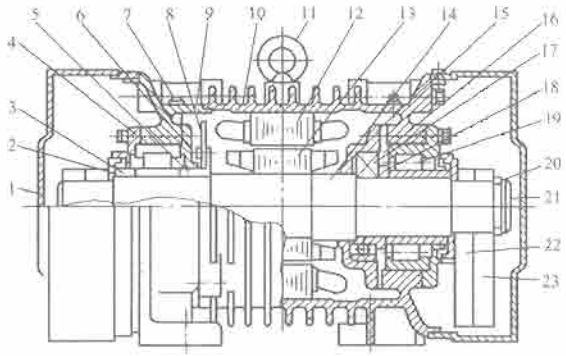


图 3.12-9　普通型振动电机典型结构

1—防护罩；2—密封盖；3、18—轴套；4—轴承外盖；5—套筒；6、15—轴承内盖；7—油杯；8—挡板；9—端盖；10—机座；11—吊环；12—定子；13—转子；14—转轴；16—间隔轴环；17—球轴承；19—圆柱滚子轴承；20—挡圈；21—刻度盘；22—固定偏心块；23—可调偏心块

1）激振力计算。振动电动机以产生激振力输出为目的，无论是设计、试验，还是在选用过程中，其激振力都是一个主要技术参数。振动电动机旋转时偏心块所能产生的偏心惯性力 F 的大小为

$$F = 4mr\omega^2 = 4mr\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 \quad (\mathrm{N})$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式中，m 为偏心块的质量，kg；r 为偏心块的偏心距，m；ω 为偏心块的转动角速度，rad/s；n 为振动电动机额定转速，r/min。

2）堵转转矩。振动电动机的堵转转矩 T_k 应满足克服偏心块质量引起的最大偏心力矩 M_g 和电动机转子转动惯量引起的惯性力矩 M_j

$$T_k \geqslant K(M_g + M_j)$$

$$M_g = 4mgr$$

式中，g 为重力加速度，$g=9.8\text{m/s}^2$；K 为振动电动机起动转矩因数。

3）转轴刚度。振动电动机由偏心质量产生的惯性力大到几千至几十万牛顿，对转轴的刚度应进行计算。设计应使转轴中间产生的最大挠度 $f \leqslant 0.1\delta$（δ 为电机气隙值），$\tan\theta \leqslant 0.5\times10^{-3}$（$\theta$ 为轴端转角）。

4）电磁负荷控制。电磁负荷应比基本系列电机的低，其热负荷约降低一半左右。

5）耐振要求。振动电动机常受到周期变化的激振力的作用，根据振动机械的要求，这种周期变化的激振力产生的加速度可达(6～8)g，个别振动机械甚至高达(10～20)g。这就要求振动电动机本身的结构件，如底脚、机壳、端盖、紧固件，特别是电动机绕组和引出电缆及接线等部位要保证在运行中的可靠性。因此，振动电动机除在结构设计中必须考虑上述要求外，还需在产品出厂前，按标准规定进行耐振试验。

6.3 功能参数

振动电动机的主要功能参数除激振力外，还有额定转速、相应激振功率。目前普通型振动电动机额定激振力等级(kN)分为1，2，3，5，10，20，30，50，75，100，140。功率等级(kW)分为0.09，0.12，0.18，0.25，0.37，0.55，0.75，1.1，1.5，2.2，3.7，5.5，6.3，7.5，10。极数为2，4，6，8极，基本对应关系和范围见表3.12-7。

表3.12-7 振动电动机的功能参数对应的关系

极 数	功率(kW)	激振力(kN)
2	0.09～3.7	1～50
4	0.12～6.3	2～100
6	0.25～10.0	3～140
8	0.37～10.0	5～140

7 交流力矩电动机

交流力矩电动机（简称力矩电机）是一种能够在低转速或堵转状态下长时间工作的感应电动机。力矩电机具有堵转转矩高、堵转电流小的特点，同时也适用于频繁起动的场合。力矩电机广泛应用于电线电缆、纺织、印染、塑料和造纸等行业，作为生产工艺流程中张力控制及动力源。

力矩电机除有三相交流力矩电动机和单相交流力矩电动机外，还有直流力矩电机。

7.1 原理与特性

7.1.1 基本原理

力矩电机的基本工作原理与一般感应电动机的完全相同，其结构也与一般感应电动机的相同。所不同的是与一般感应电动机相比，力矩电机的转子导条一般采用高电阻率材料，或采用实心钢转子。通过不断增大转子电阻，可以得到所需要的机械特性曲线，如图3.12-10所示。

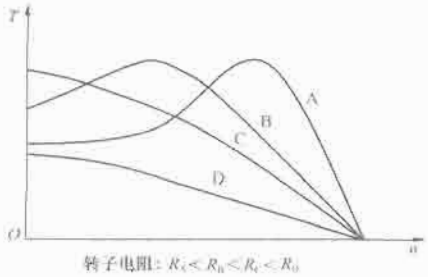


图3.12-10 随转子电阻增大而变化的机械特性曲线

对于容量较大的力矩电机，需外带背包式风机进行强迫通风冷却，以解决电机的散热问题。

7.1.2 卷绕型与导辊型力矩电机的机械特性曲线

根据实际使用场合的需要，通常把具有恒功率机械特性的力矩电机称为卷绕型力矩电机；把具有恒转矩机械特性的力矩电机称为导辊型力矩电机。卷绕型交流力矩电动机与导辊型交流力矩电动机典型的机械特性曲线如图3.12-11所示。

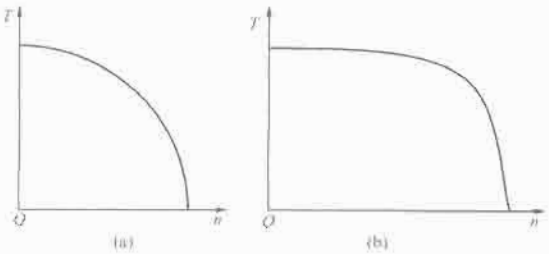


图3.12-11 卷绕型与导辊型力矩电机典型的机械特性曲线
(a) 卷绕型；(b) 导辊型

7.1.3 特性系数

力矩电机在额定电压、额定频率下，按规定的堵转时间，在其实测的机械特性曲线上，相对于1/4和3/4同步转速时的转矩 T_1 和 T_2（见图3.12-12）之比称为特性系数，用字母 k 表示，即有

$$k = T_1/T_2$$

一般 k 值越大，越能满足卷绕工艺的要求。JB/T 6297—1992《YLJ系列力矩三相异步电动机技术条件》规定，对于机座号132及以下的力矩电机，$k\geqslant2.0$；对于机座号160～180的力矩电机，$k\geqslant1.6$。

7.1.4 转矩的最大变化率

力矩电机在额定电压、额定频率下，按规定的堵转时间，其实测的机械特性曲线在1/4～3/4同步转速范围内转矩的最大变化率按下式计算

$$\sigma = (T - T_L)/T \times 100\%$$

式中，T_L 为对应于由实测机械特性曲线上的1/4和3/4同步转速时二点转矩值连线构成的线性机械特性曲线上转速为 n' 时的转矩值（见图3.12-12）；T 为对应于由实测机械特性曲线上转速为 n' 时的转矩值，n' 为实测机械特性曲线与线性机械特性之间转矩偏差最大时所对应的转速。

JB/T 6297—1992规定，转矩的最大变化率 σ 应不大于10%。一般转矩的最大变化率 σ 的值越小，表明力矩电机实测的机械特性曲线的线性度越好。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

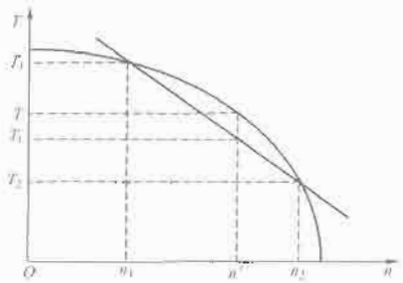


图 3.12-12　卷绕型力矩电机的特性参数

7.2　设计特点

由于力矩电机运行方式的特殊性，在设计时需特别注意以下几点：

1）转子结构。交流力矩电动机的转子结构常采用笼型转子结构和实心转子结构。对于笼型转子结构，转子导条一般采用高电阻率材料，有铸铝和铜条焊接两种方式。为了增大堵转转矩，铸铝转子槽形一般采用上窄下宽的倒梨形槽。一般在采用铸铝工艺无法达到电动机特殊要求的情况下采用铜条转子。

但对于要求频繁起动、制动及反转的力矩电机，采用实心转子则具有更明显的优越性。虽然实心转子力矩电机的单位出力只有叠片笼型转子的 60%～70%，但其具有堵转转矩大、堵转电流小、电机起动时间短和发热量小的优点，故已得到广泛的应用。实心转子力矩电机有采用实心钢和采用粉末冶金工艺制造的铜铁合金实心转子等结构。采用铜铁合金实心转子结构，通过调整铜、铁元素之间的比例关系，可以得到所需要的各种不同的磁导率和电阻率，以满足实际工业运行使用的需要。铜含量为 20%左右的铜铁合金是目前经常使用的铜铁合金实心转子较理想的合金材料。

为了进一步改善交流力矩电动机的性能，综合叠片笼型转子和实心转子各自的优点，也可以采用双层组合转子结构，其外层是实心转子，内层为叠片转子或叠片笼型转子。

为了省去调压器并实现连续调节转矩的需要，也可把转子设计成两段，实心钢转子部分和定子铁心等长，另外，增加一小段硅钢叠片转子铁心，转子铁心可在轴上整体滑动。实心钢转子段的涡流与气隙磁场相互作用产生转矩，而硅钢叠片转子铁心段仅起导磁作用。随着硅钢叠片转子铁心段进入定子铁心段长度的逐渐增加，实心钢转子段与定子铁心段相对应的有效长度逐渐减少，力矩电机的转矩也将逐渐减少，从而可实现无级调节转矩的目的。

为了降低转子的表面铁耗，采用实心转子时，其气隙长度一般比相同条件下的笼型转子约大 50%～100%。

2）通风与散热。由于交流力矩电动机经常工作于低速甚至堵转状态下，宜采用较高耐热等级绝缘材料。对于小机座号的力矩电机，由于发热量相对较小，可以采用机座带散热筋结构自然冷却；对于较大机座号的力矩电机，除采用机座带散热筋外，还必须外带背包式风机进行强迫通风冷却，以保证电机在允许的温升范围内运行。

3）极数的选择。交流力矩电动机极数的选择，应兼顾到堵转转矩和同步转速两个指标的需要。实际使用过程中常选用的极数是 4 极、6 极、8 极；有时根据需要，也可设计成变极多速力矩电机。

7.3　力矩电机的应用

力矩电机的使用是否合适，是否充分发挥了其内在的潜力，关键在于电机的合理选用。力矩电机工作转矩值的选用一般宜为堵转转矩的 1/3～2/3；工作转速的选用一般宜为同步转速的 2/3～1/3。力矩电机最佳工作运行点选择一般是：工作转矩取堵转转矩的 1/2，工作转速取同步转速的 1/2。力矩电机用于卷绕类的运行场合是最为广泛的用途之一。

7.3.1　恒功率特性

在纺织、造纸、橡胶、塑料、金属线材和电线电缆等行业中，需要将产品卷绕到卷筒（盘）上。在卷绕过程中，由于产品卷绕到卷筒（盘）时的直径愈卷愈大，卷绕力矩也会随之增大，但此时一般要求被卷物所承受的张力恒定、线速度保持不变，就是要求卷筒（盘）的转速愈卷愈小、卷绕力矩愈卷愈大，即要求电机处于恒功率运行状态，亦称卷绕特性。而卷绕型力矩电机的机械特性恰好能满足这一要求。

通常被卷物的负载特性为

$$P_1 = FV$$

式中，P_1 为卷绕时所需要的功率，W；F 为卷绕时所需要的张力，N；V 为卷绕时的线速度，m/s。

力矩电机的输出功率为

$$P_2 = T\Omega = 2\pi nT/60$$

式中，P_2 为力矩电机的输出功率，W；T 为力矩电机的输出转矩，N·m；Ω 为力矩电机的旋转角转速，rad/s；n 为力矩电机的转速，r/min。

被卷物的负载特性实际上是一条双曲线，而卷绕型力矩电机则具有很软的机械特性，如图 3.12-13 所示。对于张力控制要求不高的运行场合，卷绕型力矩电机所具有的机械特性基本能控制被卷物品的张力。如果力矩电机再配以相应的控制装置，则能够更好地满足张力控制的需要。采用复合转子结构的力矩电机，通过配合控制装置进行调压调速，调速范围可达 1∶10，转速变化率达到小于或等于 2%的精度，目前已获得应用。

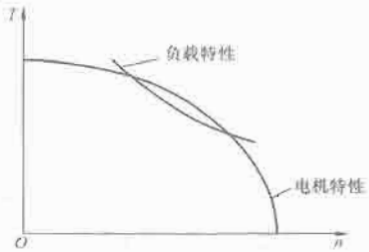


图 3.12-13　恒功率负载与力矩电机特性

7.3.2　制动恒功率特性

在有的生产过程中，有时需要把卷绕在卷筒上的物品输送到下一个工序，在输送过程中，要求施于物品一个与传动方向相反的张力，同时要求随着卷筒直径的变化，而保持物品传动的线速度和反张力保持恒定，这就要求力矩电机具有制动恒功率特性，亦称开卷特性，如图 3.12-14 所示。电缆的加工过程中，电缆绞线机用于多芯电缆挤包塑料护套时，电缆卷筒放线时的线速度和反张力即要求保持恒定。选用卷

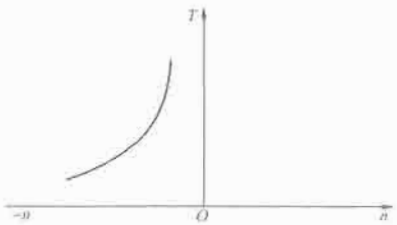


图 3.12-14　制动恒功率特性（开卷特性）

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

绕型力矩电机装在开卷装置中，并使电机的旋转方向与卷筒实际转向相反，此时，电机处于反转状态，所产生的制动力矩能保证电缆卷筒线速度和反张力维持恒定。

7.3.3 恒转矩特性

在有的生产过程中，物品需要通过较多的滚筒进行传递。为了使物品在较长距离的传递过程中，不致被滚筒的静摩擦等因素所拉伸和变形，即在物品通过滚筒时，物品所受到的张力不因滚筒速度的变化而变化，则要求驱动滚筒的力矩电机的机械特性为恒转矩特性，亦称导辊特性，如图3.12-15所示。

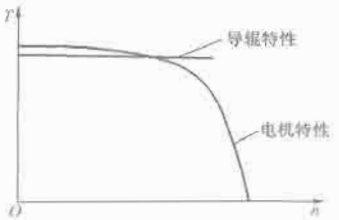


图3.12-15 恒转矩负载与力矩电机特性

7.3.4 制动恒转矩特性

在有的生产过程中，有时要求在一个直径固定的导辊上传递一个物品，且要求在不同的传递速度时，施于物品一个恒定的反张力。这时要求力矩电机具有制动恒转矩特性，如图3.12-16所示。

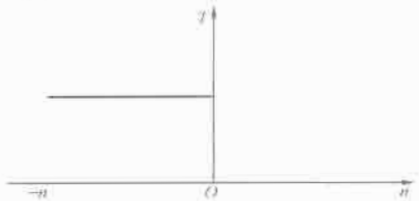


图3.12-16 制动恒转矩特性

7.4 主要技术参数

YLJ系列力矩三相异步电动机的主要技术参数见表3.12-8和表3.12-9，其他技术指标参阅JB/T 6297—1992《YLJ系列力矩三相异步电动机技术条件》。

表3.12-8 YLJ系列（IP44）力矩三相异步电动机的主要技术参数

机座号	同步转速（r/min）		
	1500	1000	750
	额定堵转转矩（N·m）		
100L	4.0	5.0	5.0
112M	5.0	6.0	6.0
132M	6.0	10.0	10.0
160L	10.0	16.0	16.0
	16.0	—	25.0

表3.12-9 YLJ系列（IP21）力矩三相异步电动机的主要技术参数

机座号	同步转速（r/min）		
	1500	1000	750
	额定堵转转矩（N·m）		
63	0.5	0.5	0.5
	—	1.0	1.0
71	1.0	1.6	1.6
	1.6	2.0	2.0
80	2.0	3.0	3.0
90S	3.0	4.0	4.0
90L	4.0	5.0	5.0
100L	5.0	6.0	6.0
112M	8.0	10.0	10.0
	10.0	—	—
132M	16.0	16.0	16.0
	25.0	25.0	25.0
	40.0	40.0	40.0
160L	60.0	60.0	60.0
	80.0	80.0	80.0
	100.0	100.0	100.0
180L	125.0	125.0	125.0
	160.0	160.0	160.0
	200.0	200.0	200.0

8 电梯用感应电动机

电梯用三相感应电动机是电梯电动机中的一种主要类型，就目前来讲它仍占有电梯电动机约60%～70%的份额。

电梯用感应电动机适用于各种类型乘客电梯、客货电梯、病床电梯及载货电梯。电梯的运行工况比较复杂，经常处于频繁起动、加速运行及减速平层制动工作状态。电梯电动机的实际工况为断续周期工作制（S5），根据电梯的不同要求，每小时起制动次数有120、180、240等。由于电梯电动机使用场合和环境的特殊性，对它的要求往往比通用电动机高。一般来说，它具有振动小、噪声低、起动电流小、有足够起动转矩、运行平稳等性能要求。由于电梯负载属于恒转矩型机械特性，所以所有的电梯电动机都是按恒转矩要求来设计考虑的。

电梯用感应电动机按驱动控制方式的不同可分为双速电梯用感应电动机、调压调速电梯用感应电动机和变频调速电梯用感应电动机。

8.1 双速电梯用感应电动机

8.1.1 性能要求

所谓双速电梯用感应电动机一般是带有2套定子绕组的三相感应电动机，一套绕组为高速绕组，通常采用4极或6极；另一套绕组为低速绕组，通常采用16极、18极或24极。高速绕组也称运行绕组，用于起动和运行；低速绕组则用于制动和平层。也有采用3套定子绕组的双速电梯用感应电动机，其中有1套绕组专门用于电动机的起动。由于电梯不是连续恒速运行的负载，它的使用工况常处于满载以至超载频繁起制动状态下，所以双速电梯用感应电动机的机械特性须符合图3.12-17中A曲线的要求，它的起动转矩比较大，在转速升高的过程中，转矩大小变化波动小，故能满足

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

平稳起动的要求。一般高速绕组运行时的转差率为 8%左右，低速绕组运行时的转差率为 16%左右。而普通感应电动机的机械特性如图 3.12-17 中 B 曲线的形状，显然不能满足双速电梯的开环运行工况，若使用这种特性曲线的电动机，将使电梯的舒适感极差，并使电梯轿厢振动很大，甚至发生起动困难。

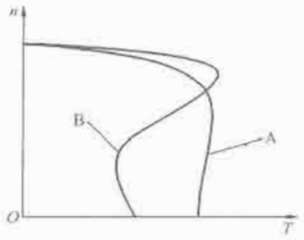


图 3.12-17　感应电动机机械特性曲线
A—电梯用电动机特性；B—普通电动机特性

双速电梯用感应电动机的现场运行是通过高速绕组和低速绕组的相互切换来完成的。起动和运行由高速绕组通电工作，在起动阶段通常还接入电阻或电抗，以减小过大转矩的冲击和降低起动电流；当电动机进入减速和制动阶段时，电动机工作状态由高速绕组切换到低速绕组，由于此时电动机转速大于低速绕组的同步转速，所以此时低速绕组处于发电制动状态；当电动机转速降到低速绕组同步转速以下时，则电动机处于低速绕组电动机工作状态，电梯处于平层阶段；最后电动机在机械制动器的作用下转速降为零。

综上所述，双速电梯用感应电动机在运行中转速的调节不是平滑的，而是一级一级地作调节，所以电梯运行舒适感较差，电梯的平层精度也较低。但是，这种驱动控制方式是简单和经济的，所以至今仍被应用，如很多货梯还是采用双速电梯。

在双速电梯用感应电动机中，就其通风冷却方式来看，有带风机通风冷却的，有自带风扇通风冷却的，也有采用开启式自然散热等冷却方式；就其所驱动的曳引机来看，都是有齿轮曳引机，常用于速度 1.0m/s 以下的电梯。双速电梯电动机都不采用速度闭环控制方式，故在电动机副轴伸都带有较大转动惯量的飞轮，以改善其工作状态切换时所引起的转速突变。

8.1.2　设计特点

1）大多数采用铜条焊接的笼型转子结构，合理选择笼型转子导条和端环的材料，合理确定定转子槽形尺寸，以满足机械特性的要求。

2）在额定电压和额定频率下，电动机高速绕组的堵转转矩应不低于 2.2 倍额定转矩，低速绕组的堵转转矩应不低于 1.4 倍额定转矩，容差均为−15%；电动机的堵转电流应不大于 4.5 倍额定电流，容差为+20%。

3）在额定电压和额定频率下，电动机高速绕组的转差率应不大于 12%，低速绕组的转差率应不大于 20%。

4）选用较大的气隙长度、较低的气隙磁通密度和控制电动机的气隙不均匀度，以减小电动机运行时的电磁噪声。

5）为降低电动机的噪声和振动，常采用滑动轴承结构，电动机的轴向窜动量应不大于 3mm。

6）对于采用 2 套绕组或 3 套绕组的双速电梯用感应电动机，在每个定子槽中都嵌放 2 套或 3 套绕组的线圈。在绕组参数设计时，除了要满足各套绕组的性能要求外，还要根据电动机的使用工况，合理选择各套绕组的热负荷和在定子槽内的占据空间。例如，高速绕组是主绕组，工作时间较长，所以取相对较低的热负荷；而低速绕组工作时间短，则热负荷取得较高。因此低速绕组在电梯安装检修时作短时电动机运行时，电动机从冷态开始运行时间一般不能连续超过 3min，无采用热敏元件作热保护措施的，则更需随时监视电动机的发热情况。

7）双速电梯也有采用单绕组变极的感应电动机，运行时是通过改变接线方式来实现变极的。它 1 套绕组要完成 2 套绕组的功能，1 套绕组要兼顾 2 套绕组的特性，这在设计时要予以考虑。

8.2　调压调速电梯用感应电动机

8.2.1　性能要求

调压调速电梯用感应电动机一般与双速电梯用感应电动机相似，通常是带有 2 套绕组的三相感应电动机，一套绕组为高速绕组，也称运行绕组；另一套绕组为低速绕组，也称制动绕组。

调压调速电梯电动机的驱动控制方式与双速电梯电动机不一样，其起动是通过三相电源电压逐步升高的过程来完成的，通过这种方式来减小起动电流和使电动机起动平稳。其减速和制动是通过把直流电通入低速绕组来进行的。当低速定子绕组中输入直流电流后便建立了静止不转的磁场，在该磁场中仍在旋转的转子的导条中便感应电动势而产生电流，于是便产生电磁转矩，该转矩方向正好与电机旋转方向相反，故起制动作用，通常称这种制动方式为能耗制动。由于在能耗制动过程中，可无级调节直流电流的大小，以满足制动转矩的要求，并且可以制动到电机转速 $n=0$，所以相对于双速电梯来说，调压调速电梯的舒适感和平层精度等性能指标有了较大提高。

然而，调压调速电梯电动机在运行中的工况是相当恶劣的，电机发热严重，尤其是在能耗制动过程中电梯运动部件巨大的能量都将转化为热能消耗在电动机转子上，所以随着变频调速电梯的发展，调压调速电梯已被取代。调压调速电梯用感应电动机通常用于梯速 1.0～1.75m/s 的电梯，所驱动的曳引机都是有齿轮曳引机。电动机的驱动系统都采用速度闭环控制，所以电动机的副轴伸常需与测速发电机或旋转编码器进行连接。

8.2.2　设计特点

1）电动机 2 套绕组所采用的极数与双速电梯用感应电动机相同，运行绕组通常采用 4 极或 6 极，制动绕组通常采用 16 极、18 极或 24 极。

2）电动机的机械特性较软，所以笼型转子导条和端环材料的选择、定转子槽形尺寸的确定都需在设计时予以考虑。实际应用中，铜条焊接的转子结构和铸铝的转子结构都有采用。

3）电动机堵转转矩、堵转电流和转差率等指标与双速电梯用感应电动机相仿。

4）电动机低速绕组设计时须兼顾通直流电作制动绕组用时的制动特性和通三相交流电作短时安装检修运行用时的电动机特性。

5）为了解决电动机的发热问题，所有调压调速电梯用感应电动机都采用带风机强迫通风的冷却方式，而且在电动机 2 套绕组中都埋置开关型特性的 PTC 热敏电阻，以保护电动机绕组。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

8.3 变频调速电梯用感应电动机

8.3.1 性能要求

变频调速电梯用感应电动机都采用1套定子绕组，用于有齿轮驱动的通常采用4极绕组，也有采用6极绕组的，用于无齿轮驱动的，则采用8极以上较多极数的绕组。

电动机都由变频器供电，通常都采用矢量控制方法。通过变频器的矢量控制，使得电动机的机械特性曲线变得和直流电动机的一样，是一条直线，从而使感应电动机具有和直流电动机一样的可控性，其调速性能可与直流电动机媲美。电动机在起动和升速过程中，在变频器的控制下，可获得平稳起动加速，而且起动电流可限制在一定范围内。电动机减速也是在变频器控制下，电动机处于发电制动状态，使电动机在制动转矩的作用下减速。电动机的变频器矢量控制驱动系统都采用速度闭环控制，所以电动机的副轴伸常装有旋转编码器。

与双速电梯用感应电动机和调压调速电梯用感应电动机相比，变频调速电梯用感应电动机只需1套定子绕组，而且电动机的转差率设计得较小，因此电动机的结构简化许多，体积和重量大大减小，电动机的损耗和发热显著降低，效率得到了提高。采用变频调速矢量控制后，电动机优良的运行性能使电梯舒适感、平层精度、噪声和振动等性能指标得到了明显提高。现在，变频调速电梯用感应电动机已是电梯电动机市场中的主流产品，而且覆盖面广，从有齿轮驱动到无齿轮驱动，从低速梯、中速梯到高速梯，从客梯到货梯，从住宅梯到特种梯都得到了大量应用。

8.3.2 设计特点

1）电动机在进行电磁设计计算时，不仅要满足额定工作状态（电压、频率、转矩）下的性能参数，而且要考虑在额定转矩下电动机在变频调速范围内的性能，尤其是电动机在低速段的性能情况须兼顾考虑。

2）电动机的起动是通过变频变压方式来完成的，因此电动机不必具有工频起动的性能，设计中不受起动性能的限制，电动机槽形的选择不再受起动转矩的影响，电动机的转差率设计较小，通常在2%～4%范围。

3）笼型转子通常都采用铸铝结构，常用纯度不低于99.5%的工业纯铝铸成；也有采用铜条焊接的笼型转子结构，导条和端环常用纯铜材料。

4）用于有齿轮驱动的电动机通常都不带风机；用于无齿轮驱动的低转速大转矩电动机，为了缩小体积和减轻重量，才采用带风机的强迫通风冷却方式。

5）由于电动机采用变频器供电，较高的变频器的载波频率会带来大量瞬间脉冲尖峰电压施加在电动机的匝间绝缘和对地绝缘上，所以电动机的绝缘结构须有加强措施，以防止绝缘结构的过早损坏。

6）一些大型电梯公司为了进一步优化电梯驱动系统的设计，往往采用电动机和控制系统进行一体化设计，即变频器的参数和电动机的参数在设计开发阶段就进行了优化匹配，并经过反复调试确定，所以这类电动机的参数（如定子电阻、转子电阻、定子漏抗、转子漏抗、励磁电抗等）不可随意单独进行变动，否则会导致电梯驱动系统性能变坏。

7）由于变频器工作时产生的高次谐波会带来电磁干扰，所以绿色环保电梯需要解决电磁兼容问题。有些电梯公司在电动机上也采取了一些屏蔽措施，例如采用金属屏蔽的出线盒和电缆接头等。

8.4 电梯电机的发展方向

值得一提的是，近年来变频调速电梯用永磁同步电动机发展迅速，随着它技术上的成熟完善和更加优良的性能特点，它已越来越被人们所认识和接受，并受到市场的青睐，已成为当前交流电梯电动机的发展方向。

多年来电梯市场上绝大部分都采用有齿轮驱动，曳引机为有齿轮曳引机，曳引轮上的大转矩、低转速性能参数是由电梯电动机通过机械减速箱（通常采用蜗轮、蜗杆传动）的作用而得到的。无齿轮曳引机（大多采用直流电动机驱动，后来也有采用感应电动机 VVVF 驱动的）都是用于高档的高速电梯上，为了使电动机直接输出大转矩、低转速，电动机的体积重量往往做得很大，成本很高。自从永磁同步电动机被应用到电梯曳引机上以后，机械减速箱大多被取消了，成了永磁同步无齿轮曳引机。它与传统的有齿轮曳引机相比有以下特点：

1）体积小、重量轻。由于采用了永磁同步电动机驱动方案和取消了复杂的机械减速机构，使得曳引机的体积和重量大幅度地减小，变得小型化了。它的进步促进和推动了近年来小机房和无机房电梯的发展，节省了建筑的空间和造价。曳引机的小型化又给安装带来极大的方便。

2）节约能源。与感应电动机相比，永磁同步电动机不需要无功的励磁电流，而且转子无损耗发热问题，所以它的功率因数和效率都可以做得较高，对于选用多极数的电动机来说尤其是这样。又由于取消了减速机构，也就没有了相应的机械损耗，从而提高了曳引机的整机效率。此两项合计节能约40%。

3）减小电动机和变频器的容量。由于曳引机整机效率的提高，对于驱动同样规格的电梯来说，永磁同步无齿轮曳引机所选用的电动机功率和变频器容量都可作相应减小。

4）降低噪声。传统有齿轮曳引机的噪声大部分来自于机械减速箱和高速旋转的电动机，而采用了永磁同步无齿轮曳引机后，其转速很低，噪声也很低，可比传统有齿轮曳引机的整机噪声降低5～10dB（A）。

5）免维护、无污染。传统有齿轮曳引机需要定期更换润滑油以保证机械传动机构的正常工作，采用了永磁同步无齿轮曳引机后，就可节省这笔费用开支，并做到免维护，而且彻底解决了漏油造成的环境污染问题。

6）安全可靠。永磁同步电动机在三相绕组短接的情况下由外力来转动电动机，此时电动机会产生较大的制动力矩以阻止转动。利用这一特性，在制动器万一失灵时，可阻止电梯溜车；另外在电梯突然断电，而轿箱处于层间时，松开制动器，可使轿箱慢慢就近停靠到楼面，以解救被困人员。这一功能对感应电动机来说是无法实现的。

综上所述，就目前电梯驱动技术的发展趋势来看，永磁同步电动机将以无齿轮曳引机的形式成为电梯电动机的技术发展方向。

9 实心转子感应电动机

9.1 运行原理和应用

实心转子感应电动机的定子结构与普通感应电动机相同，其转子为实心铁磁圆柱体或圆筒，它既是磁路的铁心部分，又兼作电路的绕组，二者合为一体，这是实心转子感应电动机区别于普通感应电动机的根本之处。在实际运行时，由于集肤效应，转子电流和磁通主要集中在转子表面较薄的渗透层内，其电流（即涡流）及磁场的分布情况与普通感应电动

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

机完全不同，因而形成了实心转子感应电动机特有的性能。

与普通笼型转子感应电动机相比，实心转子感应电动机的效率和功率因数较低，但它具有的性能特点又使其在某些领域十分有用。例如，因其结构简单，转子的机械可靠性高，特别适宜于高速甚至超高速运行；起动性能好，起动转矩大而起动电流小，特别适宜于重载起动或在电源容量较小的情况下起动；机械特性“软”且具有一定的线性度，转子热稳定性好，可以较长时间处于制动运行状态，特别适宜于作为力矩电动机或作为挖掘机的动力等；另外，它还特别适宜于在频繁起动、正反转和反复短时工作状态（S3、S4 工作制）的条件下运行。

9.2　设计特点

在设计实心转子感应电动机时，其主要特点是转子参数的计算与普通笼型转子感应电动机不同。目前一般按照透入深度法来计算转子参数，即首先计算转子的透入深度

$$\Delta=\sqrt{\frac{2\rho}{s\omega_1\mu_r\mu_0}}$$

式中，ρ 为转子的电阻率，$\Omega\cdot mm^2/m$；s 为转子的转差率；ω_1 为电源角频率，1/s；μ_r 为铁磁转子的相对磁导率；μ_0 为空气的磁导率，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}H/m$。

然后按下式计算转子的电阻

$$R_2=\rho\frac{L}{\pi D_2\Delta}$$

式中，L 为转子铁心长度；D_2 为转子铁心外径。

根据铁磁体的阻抗角 $\varphi_2\approx$常数的特点，可由 R_2 计算出 X_2 和 $Z_2=R_2+jX_2$。

考虑到铁磁体转子为有限长度，并存在饱和效应、磁滞效应和涡流效应，所得到的转子阻抗还需乘以端部系数、饱和效应修正系数、磁滞效应修正系数和涡流效应修正系数。

1）端部效应，实心转子铁磁体中电流为涡流分布，且随转差率 s 不同而变化，如图 3.12-18 所示。由于存在强烈的切向电流，使转子阻抗增大，称之为端部效应，一般常用端部系数 K_e 来反映端部效应的大小

$$K_e=\left(1+\frac{\tau}{L}\right)\frac{a^2\delta+\dfrac{1}{\mu_r\Delta}}{\lambda_1^2\delta+\dfrac{1}{\mu_r\Delta}}$$

式中，$\lambda_1=a\sqrt{1+\left(\dfrac{\tau}{L}\right)^2}$；$a=\dfrac{\pi}{\tau}$；$\tau$ 为转子极距；δ 为气隙长度。

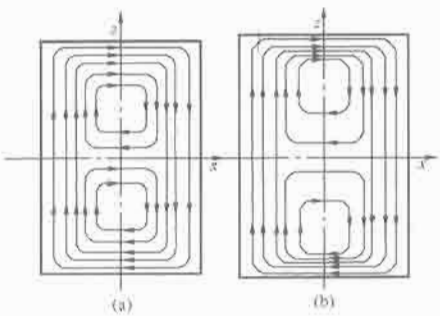


图 3.12-18　转子涡流分布示意图

(a) $s=0.2$；(b) $s=1.0$

2）饱和效应。饱和效应的关键是对转子铁磁体磁化曲线的处理。用有限元法可直接用 B-H 曲线求解转子电磁场，得到考虑饱和效应的参数典型值，例如电阻修正系数 $K_{rs}=1.31$，电抗修正系数 $K_{xs}=0.98$，转子阻抗角 $\varphi_2=36.8°$。

3）磁滞效应。一般磁场分析中都忽略磁滞的影响，在实心转子中磁通密度存在切向和径向分量，对应于脉动磁场和椭圆形旋转磁场，磁滞问题更加复杂。研究表明，如果只计及磁滞效应时，其电阻修正系数 $K_{rh}=1.14$，电抗修正系数 $K_{xh}=0.91$。

4）涡流效应。涡流效应实际上就是实心转子涡流的横轴电枢反应的影响。横轴电枢反应磁场分布如图 3.12-19 所示。一方面它改变了转子磁场分布，使主磁通减小，相当于减小了定转子间的互感，增加了转子漏抗；另一方面又使涡流实际透入深度增加，转子电阻减小，转子阻抗角增大。考虑涡流效应的电阻修正系数 $K_{re}=0.9$，电抗修正系数 $K_{xe}=1.06$。

综合考虑饱和、磁滞、涡流效应的电阻修正系数

$$K_r=K_{rs}K_{rh}K_{re}=1.35$$

电抗修正系数

$$K_x=K_{xs}K_{xh}K_{xe}=0.945$$

转子阻抗角

$$\varphi_2=35°$$

9.3　提高电机性能的措施

为了提高实心转子感应电动机的性能和扩大实心转子感应电动机的应用领域，近年来出现了许多新型或改进型的转子结构型式。例如，实心转子表面开轴向窄槽，转子两端加良导体端环，转子开槽再加端环以及各种形式的复合转子；如在实心转子表面喷涂（或电镀）良导电层，在硅钢片叠片铁心上外套铁磁体圆筒转子，在笼型转子上外套铁磁体圆筒转子。另外，还开发了各种特殊用途的实心转子感应电动机，如螺旋运动实心转子感应电动机、轴向气隙圆盘式实心转子感应电动机、弧形定于实心转子感应电动机等。

（1）开槽转子

转子表面开轴向窄槽后的磁场分布如图 3.12-20 所示。从图中可见：①大部分磁力线沿齿槽轮廓线闭合，使开槽实心转子表面的有效工作区域增加，转子阻抗减小，从而可提高电机的出力；②部分磁力线越过槽部闭合，使转子漏抗增加。

转子开槽对电机性能的改进，还有赖于选用合理的参数（槽数、槽尺寸）。对主要在小转差率运行的电机，开槽的最佳参数为：

最佳槽数　$Q_2/2p=5\sim15$

最佳槽深　$h\approx\Delta=0.01\sim0.015m$

最佳槽宽　$b=0.001\sim0.003m$

（2）两端加良导体端环的转子

实心转子感应电动机的出力较小、功率因数较低，是由于其转子阻抗 Z_2 和阻抗角 φ_2 较大。而影响 Z_2 大小的重要因素之一是由于转子中感应的涡流在转子本体内自行闭合，具有较大的切向电流分量（见图 3.12-18）。采用良导体端环后，尽复转子本体仍有部分涡流闭合，但大部分电流通过端环闭合，如图 3.12-21 所示。由于端环为良导体，又是非铁磁材料，这样使端部阻抗大大减小，等效于端部系数减小，从而使转子阻抗 Z_2 减小，提高了电机的出力和力能指标。

（3）双层转子

双层转子由两层铁心组成，外层是一个铁磁体薄圆筒，套在由普通电工钢片叠成的内层圆柱体上，形成双层转子结构，如图 3.12-22 所示。外层薄筒的厚度近似为普通笼型转

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

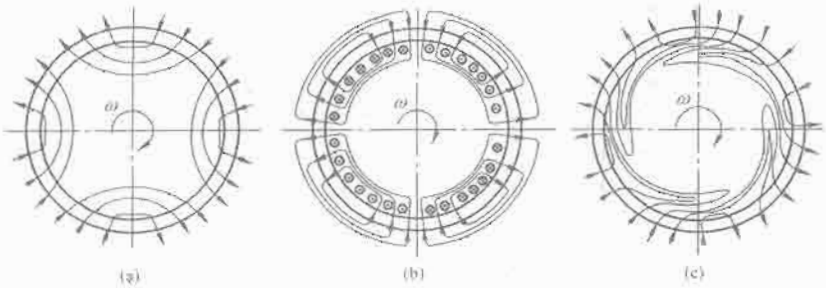


图 3.12-19 实心转子感应电动机的横轴电枢反应
(a) 主磁场分布示意图；(b) 涡流磁场分布示意图；(c) 合成磁场分布示意图

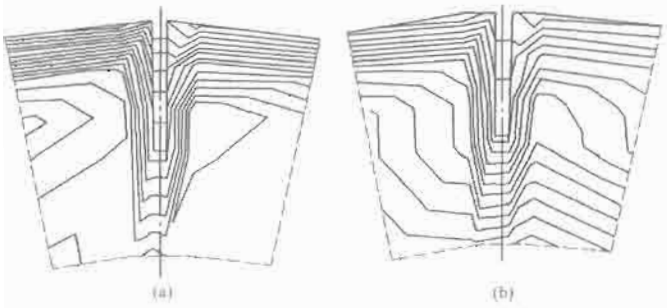


图 3.12-20 齿槽区域的磁力线分布图
(a) $s=1.0$；(b) $s=0.2$

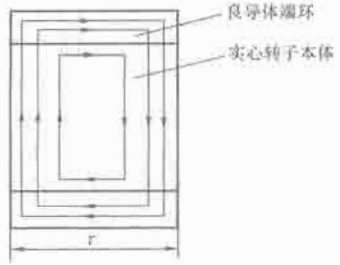


图 3.12-21 端环实心转子涡流分布示意图

子齿的高度。

在高转差率范围内运行时，从气隙进入转子的电磁波透入深度小于外层圆筒的厚度 h，其主磁场的分布如图 3.12-22 (b) (1) 所示。这时，由于主磁通没有进入到电工钢叠片的圆柱体内，电机的电磁过程和工作特性与光滑实心转子感应电动机相同，具有良好的起动品质等优点。

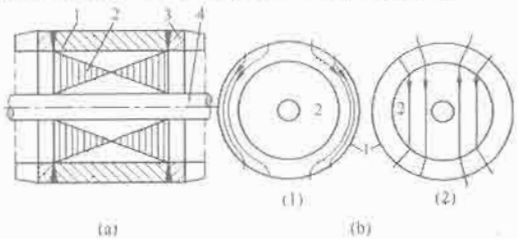


图 3.12-22 双层转子结构及转子内主磁通分布
(a) 双层转子结构；(b) 双层转子内的主磁通分布
1—铁磁体圆筒；2—电工钢叠片圆柱；3—端环；4—转轴

电机在小转差率范围内运行时，进入转子的电磁波透入深度将大于 h，主磁通将进入到电工钢叠片的圆柱体内，如图 3.12-22 (b) (2) 所示。由于叠片铁心的 μ_r 比外层圆筒的 μ_r 大得多，因此使圆筒内磁场的径向分量增大，切向分量减小，导致转子中的感应电动势增大。在相同的条件下，使电动机的转矩增大，出力提高。此外，由于主磁通的大部分沿磁阻较小的电工钢叠片圆柱内通过，从而减少了励磁电流，提高了功率因数。

(4) 复合转子

在普通笼型转子的外面再套上铁磁体薄壁圆筒，便构成了复合转子。这是通过转子结构上的复合来获得一种复合的运行特性，既有实心转子电动机优良的起动性能，又兼有笼型转子感应电动机小转差率运行时力能指标高的优点，以拓宽实心转子电机的应用领域。它与双层转子感应电动机的区别，在于由电工钢片叠成的圆柱形铁心内嵌有笼型绕组，因而它在小转差率运行时的性能比双层转子的更好，出力更高。

复合转子的钢套厚度 h 的大小对性能有很大影响。一般要求厚度 h 小于或等于 $s=1$ 时电磁波在转子中的透入深度 Δ。起动时主要是实心铁磁体钢套起作用，类似于实心转子电机；在小转差率运行时，$\Delta \gg h$，笼型转子起主要作用。因此，复合转子电机兼有二者的性能，它们的机械特性如图 3.12-23 所示。当 $h \gg \Delta$，则为实心转子电机；当 $h=0$，则为笼型转子电机，可以说实心转子、笼型转子仅是复合转子的特殊型式，三者是统一的。

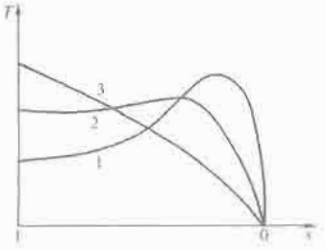


图 3.12-23 机械特性
1—笼型转子；2—复合转子；3—实心转子

10 气候防护型电动机

10.1 用途

气候防护型感应电动机能在规定的气候条件下，即在使用环境的最大降雨强度为 6mm/min，太阳辐射最大强度为 1120W/m²，并在有砂尘、冰、雪、霜、露等气候条件下正常运行。它广泛用于石油化工厂、炼油厂、化肥厂、水泥厂、发电厂等要求露天安装设备的工矿企业。

10.2 结构特点

气候防护型电动机是一种开启式电动机，外壳防护等级选用 IPW24。附加防护要求，应使因大风或暴风而进入电动机的高速空气和气载微粒不会进入直接导向电动机本身带电部件的内通风道。进入电动机带电部件的正常通风道应用挡板或独立的空腔，使进风至少有三次不小于 90°的转弯，出风有两次不小于 90°的转弯。此外，冷空气进风通道内应设置一个不大于 3m/s 的低速区，以便使带入的尘埃沉降。

大中型箱式结构电动机的气候防护要求由装在电机顶部的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

外罩来满足。用于径向通风电机的典型结构如图 3.12-24 所示。

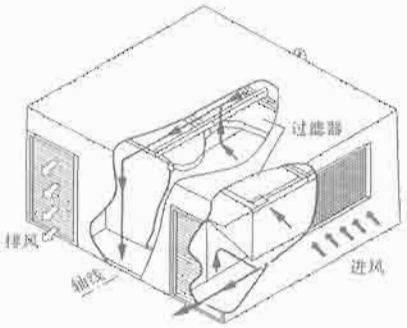


图 3.12-24　气候防护外罩气流示意图

10.3　设计特点

对于气候防护型电动机，由于采用将外部的冷空气吸入电机内部，对线圈和铁心等发热部件表面直接进行冷却，因而冷却效果较好，改变进风道面积大小，可以使电机的输出功率维持在基本系列 IP23 防护式电机的水平。YQF（笼型）、YRQF（绕线转子型）系列气候防护型电动机的机座号、功率与同步转速的对应关系与防护等级 IP23 一般用途 Y、YR 系列电动机的相同。电动机采用 F 级绝缘，温升按 B 级考核，对装有过滤器的气候防护型电动机，因过滤器有较大风阻，长期使用还会出现阻塞等情况，电动机温升有可能比不装过滤器的电动机高，故其温升限值由制造厂与用户协商确定。

11　屏蔽感应电动机

11.1　概述

在原子能、化工、石油、轻工等部门，常采用屏蔽感应电动机与泵组成泵机合一的密封整体，称之为屏蔽电泵。屏蔽电泵是无泄漏泵的一种，用于输送不含有颗粒的具有腐蚀性、对人体有害（如剧毒、放射性）、易燃易爆及价格昂贵或其他特殊的液体。

电动机内腔与转子外圆分别嵌装屏蔽套，两套之间充满泵所输送的液体，在一定范围的压力、温度下运行时，具有高度的密封性，保证被输送液体不外泄。屏蔽电机具有以下特点：①无泄漏；②外部空气不能进入内腔；③无轴封；④不需外加润滑剂，不污染所输送的液体；⑤机泵共轴并具有公共的外壳，体积小，质量轻，便于在管路上安装；⑥电动机无冷却风扇，噪声低。

常用的屏蔽电机功率范围为 0.75～132kW（2 极）和 0.75～37kW（4 极）共计约 30 多个规格。

11.2　结构特点

电机的定子和转子分别以屏蔽套密封，并利用被输送液体进入电机的部分作为冷却和润滑之用。电动机一般为立式，小功率电动机也有卧式。泵的叶轮装在电机轴上并被封闭在一壳体内。

1）结构型式。根据可输送液体的温度和压力，屏蔽电泵分为常温常压、中温常压、高温常压、常温中压、中温中压、高温中压和高温高压共计七类。

高温型屏蔽电动机的结构，从泵出口处引出的一小部分液体，经过电动机外部过滤器和冷却器冷却后，通过放气阀座再进入电动机内部，首先流经非泵端轴承，经屏蔽套间隙及泵端轴承，最后返回泵体形成循环，带走热量并润滑轴承。电动机非轴伸端的轴承套处设有副叶轮，使机内液体能单独循环。为了防止泵内高温液体的热量传导给电动机，在电动机与泵的接合处设有热屏蔽装置。有时在机座上设有水夹壳，以降低电动机的温度。

常温型屏蔽电动机的结构与高温型的相似，但无冷却装置和热屏蔽。流经电动机内部的液体最后通过入口处的叶轮平衡孔流回泵内。

高温高压型屏蔽电动机在高温型屏蔽电动机的基础上，根据系统压力适当加强结构强度。

2）屏蔽套。为了防止液体侵蚀电机定子和转子的铁心与绕组，定子内腔和转子外圆均镶装屏蔽薄套。该套用强度高、耐腐蚀性强和电阻率较高的非磁性不锈钢薄壁管制成，壁厚一般为 0.3～0.5mm，以减小电动机的气隙尺寸，降低涡流与磁滞损耗，从而提高电动机的效率和功率因数。

屏蔽套内的损耗往往超过电动机总损耗的 10%，其中涡流损耗与屏蔽套直径的三次方、铁心长度和屏蔽套厚度的一次方成比例关系。为了减少损耗，常采用较大的铁心长度与内径的比值（通常为 1.0～4.5），所以屏蔽电动机的外形细长。

3）轴承。电泵轴承工作时浸在所输送的液体中，通常采用石墨滑动轴承，经浸呋喃或酚醛处理，具有良好的耐磨性、自润滑性和耐腐蚀性，并具有足够的机械强度。在某些场合下聚四氟乙烯和陶瓷材料得到了广泛应用。与石墨对磨的是轴承套，它是由钴铬钨合金堆焊而成。在系统中还装有过滤装置，以保证润滑液体的清洁，防止固体颗粒进入电机，影响轴承寿命。

4）接线盒。接线盒空腔与电动机主空腔应严密隔离，并能承受系统压力，保证当定子屏蔽套损坏时液体不致泄漏到接线盒空腔内。接线盒内除有电源的接线端子外，还有若干控制元件及保护元件的接线端子，各引线从不同的出线孔引出。

11.3　屏蔽套损耗与液体摩擦损耗

（1）屏蔽套损耗计算

由于屏蔽套为非导磁材料，所以只需考虑涡流损耗而不考虑其磁滞损耗。

1）定子屏蔽套损耗。屏蔽电机的气隙磁场以同步转速相对定子屏蔽套旋转，在定子屏蔽套中感应涡流，引起涡流损耗。与磁场和涡流的透入深度相比，虽然屏蔽套的厚度非常薄，但其涡流损耗却很大，使得电机的效率仍然很低。涡流损耗大小计算表达式为

$$P_{p1}=0.5k_p B_\delta^2 n_1^2 D_{i1}^3 l_{i1}\delta_i \frac{1}{\rho}\times 10^4 \quad (\mathrm{W})$$

式中，B_δ 为气隙磁通密度，T；n_1 为同步速度，r/min；D_{i1} 为定子铁心内径，m；l_{i1} 为定子铁心长度，m；δ_i 为定子屏蔽套厚度，m；ρ 为屏蔽套电阻率，$\Omega\cdot mm^2/m$；k_p 为屏蔽套损耗系数，与 l_{i1}/τ 比值有关，一般取 0.8～0.9。

由上式可见，气隙磁通密度越大，屏蔽套损耗越大；屏蔽套厚度增大，则其损耗增加；屏蔽套的电阻率增加，则其损耗将降低。因此，这种电机设计时，气隙磁通密度应适当选择较低值，并应尽可能选用电阻率较高的材料作屏蔽套，以减小屏蔽套损耗。

2）转子屏蔽套损耗。电机正常运行时，转差率一般较小，转子对气隙基波磁场的相对速度很小，因此基波磁场在转子屏蔽套引起的损耗很小，可以忽略不计。但是定子齿槽引起的脉动磁场在转子屏蔽套内将感应涡流引起损耗，所以运行时转子屏蔽套中主要是脉振损耗。在定转子屏蔽套材料

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

及厚度相同的情况下，额定运行时转子屏蔽套损耗约为定子屏蔽套损耗的10%。

起动时，转子屏蔽套感应涡流情况与定子屏蔽套的相同，损耗计算参照定子屏蔽套计算公式。

(2) 液体摩擦损耗计算

屏蔽电动机的转子在液体中旋转，产生液体摩擦损耗，其值与被输液的黏度和转子的转速、尺寸、长度与直径比及间隙大小等因素有关。为了减少液体摩擦损耗，应采用较大的长度与直径比和较小的间隙。当冷却介质为水时，其摩擦损耗的近似值为

$$P_{fj} = k_j n^3 D_r^4 (D_r + 5l_{t2}) \times 10^{-4} \quad (W)$$

式中，D_r 为转子外径，m；l_{t2} 为转子铁心长，m；n 为转子转速，r/min；$k_j = 1.2 \sim 1.5$。

11.4 特殊检查项目

1) 水压试验。泵及电动机在进行各项性能测试后，对电泵整体进行水压试验。试验压力为6MPa，历时20min。对于高压屏蔽电泵应按高压容器的规范进行。

2) 屏蔽套焊缝的着色渗透检查。着色检查的目的是检查焊缝的表面品质。着色检查如果不合格，对缺陷部位允许打磨修复，但打磨后母材的厚度不得小于原尺寸的90%。

3) 屏蔽套的检漏。检漏试验的目的是检查焊缝是否有贯穿性缺陷。采用氦气质谱检漏喷吹法，一般产品的泄漏量控制在 5×10^{-5} mL/s，较重要的产品控制在 5×10^{-8} mL/s以下。

11.5 使用维护中的注意事项

1) 有水冷夹壳时，冷却水供应不得中断，水温不超过30℃。

2) 投入运行前，应将电机内腔充满被输液，以驱除空腔内的气体。

3) 投入运行前要起动排气。每旋转5～10s需停机排气1次，再起动。连续排气应不少于5次，直到确信电机内腔气体排净为止。

4) 第一次运转500～1000h后，须将电机拆开检查轴承，测量其磨损量。当轴承最大磨损部分已达到使轴承内径与轴承套外径之差为0.4～0.5mm时，则须更换轴承。

5) 随时检查电机循环液通路、过滤装置是否阻塞及机组有无杂声和振动等情况。

6) 当定子和转子屏蔽套需更换时，可将套的两端焊缝车去，然后抽出旧套更换新套。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 13 章　一般用途单相感应电动机及其设计要点

1　概述

1.1　单相感应电动机工作原理

1.1.1　单绕组运行的单相感应电动机

定子绕组通以单相交流电后产生的脉振磁动势可以分解为幅值相等、转速相等而转向相反的正序旋转磁动势和负序旋转磁动势。气隙中的正、负序旋转磁场分别切割转子导条，产生感应电动势和电流。正、负序磁场分别与转子电流作用，产生正向电磁转矩 T_{emf} 和反向电磁转矩 T_{emb}。

当转子静止时，正、负序磁动势对转子的作用相同，气隙磁场仍为脉振磁动势，$T_{emf}=T_{emb}$，转子上合成转矩等于零，电动机不能自行起动。

电动机一旦以一定的转速向任一方向转动，正、负序磁动势对转子的转差率不同，转子磁动势对它们的去磁作用不同，因而正、负序磁场幅值不等而合成椭圆磁场，与转子同向（正向）的磁场和转子电流产生的电磁转矩 T_{emf} 大于反向电磁转矩 T_{emb}，电动机沿该方向继续转动，最终稳定在同步转速附近。单相电动机转矩特性曲线如图 3.13-1 所示。

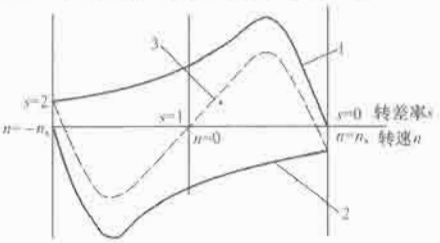


图 3.13-1　单绕组单相电动机转矩特性

1—正向电磁转矩 T_{emf}；2—反向电磁转矩 T_{emb}；3—合成电磁转矩（单绕组单相电动机转矩转速特性）

1.1.2　具有两相绕组的单相感应电动机

当定子上放两个阻抗不同的绕组且空间相轴夹角为 θ 时，通以单相交流电后，两相电流时间相位差角为 ϕ，分别产生脉振磁动势，且各自分解为一对正、负序旋转磁动势，将两个正序磁动势和负序磁动势分别相加，得到合成的正序和负序旋转磁动势。在一般情况下，正、负序磁动势幅值不等，最后合成为椭圆磁动势，合成电磁转矩大于零，电动机可以自起动并加速，最终稳定在同步转速附近。改变空间相角和时间相角都会引起合成磁动势正、负分量及椭圆形状的变化。

所以，单绕组运行单相电动机只需要在起动时有一个起动绕组辅助它形成椭圆磁动势（单相电阻起动和电容起动电动机属此类）即可自行起动，当转速达到 70%～85%同步转速时，单绕组单相电动机自身的椭圆磁动势正、负分量之差足够大，合成电磁转矩足以使电动机继续加速，起动绕组可以断开。

单绕组单相电动机气隙磁动势的椭圆度只决定于转速，而两绕组单相电动机的气隙磁场椭圆度还与对应转速下两绕组产生的磁动势幅值及相位角差有关，可以通过调整绕组参数，改变绕组的电流幅值（磁动势幅值）和相位使负序磁动势幅值尽量减弱，最终使该转速下的气隙磁场由椭圆形接近圆形，从而改善电动机在该转速下的运行性能。因此，除了两相正交绕组外，还有两相非正交绕组，Y 联结三绕组，L 型联结主、起动绕组双抽头，T 形联结起动绕组抽头等绕组型式和异型槽定子冲片等单相感应电动机，型式不一，带来了计算方法和绕组制造上的差异，但最终达到了某些性能的改善或材料耗费降低的目的。

它们的转子绕组结构型式为笼型。

1.1.3　罩极式单相感应电动机的旋转原理

罩极式电动机在单相感应电动机中是结构比较特殊的一种电动机。此种电动机定子可制成凸极式或隐极式，一般做成凸极式，有两极和四极两种。每个磁极在 1/3～1/4 全极面处开有小槽，如图 3.13-2 所示，把磁极分成两个部分，在小的部分上套装上一个短路铜环（起动绕组），好像把这部分磁极罩起来一样，所以叫罩极式电动机。运行绕组（主绕组）套装在整个磁极上，每个极的线圈是串联的，连接时必须使其产生的极性依次按 N、S、N、S 排列。当定子绕组通电后，在磁极中产生主磁通，根据楞次定律，其中穿过短路铜环的主磁通在铜环内产生一个在相位上滞后 90°的感应电流，此电流产生的磁通在相位上也滞后于主磁通，它的作用与电容式电动机的起动绕组相当，从而产生旋转磁场使电动机转动起来。它的旋转方向总是由超前磁通向滞后磁通的方向，即由主磁极向短路环方向旋转。其转子也是笼型的。

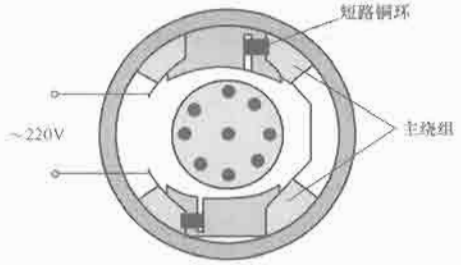


图 3.13-2　凸极式罩极电动机结构简图

1.2　气隙谐波磁动势

1.2.1　脉动磁动势引起的谐波

通以单相交流电的单绕组单相感应电动机定子脉动磁动势是个非正弦量，利用傅里叶级数分解，可以得到一系列奇次项正弦磁动势，磁动势级次通式为 $\gamma=2k+1(k=0,1,2,3,\cdots)$，每一级次脉振磁动势都可以分解为一对幅值相等、转向相反、转速相等的旋转磁动势。当电动机旋转时，正序磁场幅值大于负序磁场幅值，两者又合成一个椭圆旋转磁场，因此，旋转的单绕组单相电动机气隙中有对应于每一级次脉振磁动势所形成的椭圆旋转磁场。

除了基波磁动势以外，其余的磁动势分量都称为谐波磁动势，显然单相电动机谐波含量比三相电动机的大得多，一是谐波的级次多（三相电动机不含有三及三倍级次谐波），二是槽数少，谐波幅值大，因而对电动机的危害更为严重，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

尤其是：

1）引起较大的附加转矩，特别是起动时的同步附加转矩，给起动带来困难，严重时出现“死点”。

2）产生倍频转矩和较低次谐波的附加径向力波，因此，振动、噪声较大。

3）附加损耗增大，导致电动机效率降低，温升升高，使铜铁材料的消耗增加。

1.2.2 齿槽变化引起的齿谐波

由于定子或转子上齿槽的影响，磁导将产生周期性变化，而引起气隙磁通密度的大小周期性变化，而产生了齿谐波。齿谐波也会对电动机的运行产生不良的影响。

1.3 单相感应电动机产品特征分类及用途

1.3.1 单相感应电动机的主要特点

由于一般用途单相感应电动机形成的旋转磁场一般是椭圆形的，比三相的圆形旋转磁场要差一些，产生的谐波、噪声、振动相对而言要偏大一些，但它只需一相电源，而且具有结构简单、造价低廉、运行可靠等一系列优点。因此，它广泛使用于小型机床、农业机械、医疗器械、日用电器、科研及教学设备、办公自动化设备等领域，成为首选的动力。

1.3.2 单相感应电动机产品特征分类

一般用途单相感应电动机的标准化、系列化、通用化程度很高，根据起动特点及结构型式，最具代表性的五大基本系列型号为：YU 系列（电阻起动感应电动机）、YC 系列（电容起动感应电动机）、YY 系列（电容运转感应电动机）、YL 系列（电容起动和运转感应电动机即双值电容感应电动机）和罩极式感应电动机。

它们分别对应的标准是：JB/T 1010—2007YU 系列电阻起动异步电动机技术条件、JB/T 1011—2007YC 系列电容起动异步电动机技术条件、JB/T 1012—2007YY 系列电容运转异步电动机技术条件、JB/T 9542—1999 双值电容异步电动机通用技术条件、JB/T 4269—2002 罩极异步电动机通用技术条件，前四种的功率等级和机座号（即中心高）见表 3.13-1。

它们的结构特点如下：

（1）电阻起动感应电动机

定子铁心中安放主绕组和起动绕组，它们的轴线在空中相隔 90°电角度，起动绕组有较大的电阻，起动绕组仅起动过程中使用，起动完毕后应将其切除。为使起动绕组有较高的电阻对电抗的比值，通常采用如下方法：

1）绕组选用较细或电阻率较大的导线，以增大电阻。

2）使部分导线反绕，以增大电阻，减小电抗。

3）可串入一个适当的外加电阻。

（2）电容起动感应电动机

定子铁心中安放主绕组和起动绕组，它们的轴线在空间相隔 90°电角度，起动绕组的导线较粗，即电阻较小，还和一个电容量较大的起动电容串联。但起动电容的电容量的选择必须合适，一般是几十微法到几百微法，以使起动时两绕组的合成磁场基本上是圆形旋转磁场。起动绕组仅在起动过程中使用，起动完毕后应将其切除。

（3）电容运转感应电动机

定子铁心中安放主绕组和副绕组，它们的轴线在空间相隔 90°电角度，副绕组串接一个工作电容器，副绕组长期参与运行。因电动机只有一个电容器，且是按正常运行设计的，因此，它的电容量比起动电容要小得多，一般只有几微法到几十微法。正因为它是按正常运行设计，所以它的起动转矩较小，起动完毕后不能将其切除。

（4）电容起动和运转（双值电容）感应电动机

定子铁心中安放主绕组和副绕组，它们的轴线在空间相隔 90°电角度，但副绕组与两个并联的电容器串接，其中一个是起动电容器，电容量较大；另一个是运行电容器，电容量较小。起动过程中两个电容器参与工作，起动过程完成后，切除起动电容器，它的运行电容器与副绕组是长期通电工作的。

（5）罩极式感应电动机

它的结构特点参见本章第 1 节的 1.1.3 罩极式单相感应电动机的旋转原理。

1.3.3 单相感应电动机的用途

上述五种基本型式的单相感应电动机的结构特点、工作原理和典型用途见表 3.13-2。

表 3.13-1 单相感应电动机基本系列功率等级和机座号

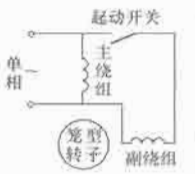
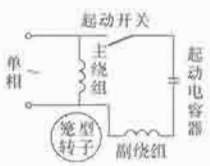
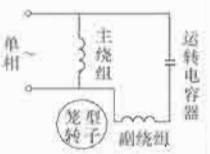
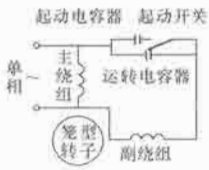
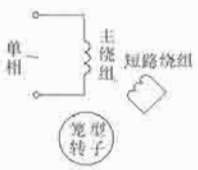
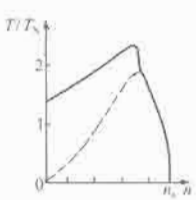
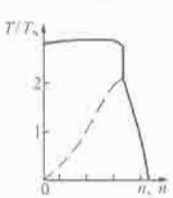
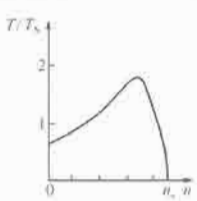
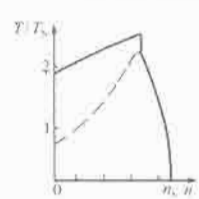
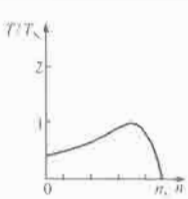
机座号	铁心代号	YU 系列		YC 系列			YY 系列			YL 系列	
		同步转速（r/min）		同步转速（r/min）			同步转速（r/min）			同步转速（r/min）	
		3000	1500	3000	1500	1000	3000	1500	1000	3000	1500
		功率（W）		功率（W）			功率（W）			功率（W）	
45	1	—	—	—	—	—	16	10	—	—	—
	2	—	—	—	—	—	25	16	—	—	—
50	1	—	—	—	—	—	40	25	—	—	—
	2	—	—	—	—	—	60	40	—	—	—
56	1	—	—	—	—	—	90	60	—	—	—
	2	—	—	—	—	—	120	90	—	—	—
63	1	90	60	—	—	—	180	120	—	—	—
	2	120	90	—	—	—	250	180	—	—	—
71	1	180	120	180	120	—	370	250	120	370	250
	2	250	180	250	180	—	550	370	180	550	370
80	1	370	250	370	250	—	750	550	250	750	550
	2	550	370	550	370	—	1100	750	370	1100	750

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

机座号		铁心代号	YU 系列		YC 系列			YY 系列			YL 系列	
			同步转速 (r/min)		同步转速 (r/min)			同步转速 (r/min)			同步转速 (r/min)	
			3000	1500	3000	1500	1000	3000	1500	1000	3000	1500
			功率 (W)		功率 (W)			功率 (W)			功率 (W)	
90	S	—	750	550	750	550	250	1500	1100	550	1500	1100
	L	—	1100	750	1100	750	370	2200	1500	750	2200	1500
100L		1	—	—	1500	1100	550	—	—	—	3000	2200
		2	—	—	2200	1500	750	—	—	—	—	3000
112M		—	—	—	3000	2200	1100	—	—	—	—	—
132	S	—	—	—	3700	3000	1500	—	—	—	—	—
	M	—	—	—	—	3700	2200	—	—	—	—	—

表 3.13-2　　单相感应电动机的结构特点、工作原理和典型用途

电动机类型	电阻起动	电容起动	电容运转	双值电容	罩极式
结构特点	接在单相交流电源上的主、副两绕组，在空间错开 π/2 电角度，主绕组电感较大，副绕组电阻较大，副绕组电路中串入起动开关触头，转子上有笼型绕组及起动开关（通常用离心开关）	接在单相交流电源上的主、副两绕组，在空间错开 π/2 电角度，主绕组电感大，副绕组电路中串入起动电容器及起动开关触头，转子上有笼型绕组及起动开关（通常用离心开关）	接在单相交流电源上的主、副两绕组，在空间错开 π/2 电角度，主绕组电感大，副绕组电路中串入运转电容器，是容性，转子上有笼型绕组	接在单相交流电源上的主、副两绕组，在空间错开 π/2 电角度，主绕组电感大，副绕组电路中串入了两个并联的电容器，其中一个电容器与起动开关触头串联，转子上有笼型绕组及起动开关（通常用离心开关）	主绕组接在单相交流电源上，可为凸极集中绕组，亦可为隐极分布绕组，起动绕组为短路绕组（短路环），又称罩极绕组，一般在磁极极面 1/2～1/3 处开有一个或两个小槽，用以安置罩极绕组，转子上有笼型绕组
接线原理图					
工作原理	起动过程中，主、副两绕组同时工作，当转子转速上升至 70%～85%同步转速时，副绕组被切除，由主绕组单独工作	起动过程中，主、副两绕组同时工作，当转子转速上升至 70%～85%同步转速时，副绕组及起动电容器均被切除，由主绕组单独工作	起动及运转过程中，主绕组和副绕组两绕组同时工作	起动过程中，主、副绕组及两个电容器同时工作，当转子转速上升至 70%～85%同步转速时，起动开关开断，切除起动电容器，其余部分始终参与工作	主绕组与罩极绕组在空间上有一定的相位差，其对应的磁通有一定的时间相位差，可形成椭圆磁场。两绕组始终同时工作
性能特点	具有中等堵转转矩，堵转电流较大	具有高的堵转转矩，堵转电流中等	堵转转矩小，堵转电流小，有较高的效率及功率因数	具有较高的堵转转矩，较高的效率及功率因数，堵转电流中等	堵转转矩小，效率和功率因数低
机械特性曲线 $T/T_N=f(n)$ T/T_N—输出转矩倍数 T_N—额定输出转矩 n—转速					
最大转矩倍数	≥1.8	≥1.8	≥1.7	≥1.7	≥1.3
堵转转矩倍数	0.8～1.7	2.0～3.0	0.30～0.60	1.7～1.8	0.3

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

电动机类型	电阻起动	电容起动	电容运转	双值电容	罩极式
堵转电流倍数	6～9	4.5～6.5	4～5	4.5～6.5	—
功率范围（W）	60～1100	120～3700	6～2200	250～3000	4～8
机座号	63～90	71～132	45～90	71～100	—
额定电压（V）	220	220	220	220	220
同步转速（r/min）	3000，1500	3000，1500，1000	3000，1500，1000	3000，1500	3000，1500
典型应用	适用于小型机床、鼓风机、医疗器械等	适用于小型空气压缩机、磨粉机、医疗器械及农业机械等需要高起动转矩的场合	适用于清水泵、风扇、电影放映机等对起动转矩要求不高，而工作时间长，接近额定负载的场合	适用于机床、农副产品加工机械、空气压缩机、泵、医疗器械、建筑机械、日用电器等	适用于仪用风扇、电动模型及各种轻载起动的单相感应电动设备

2 单相感应电动机的设计要点和主要参数

2.1 一般单相感应电动机设计要点

设计单相感应电动机时，要考虑它的气隙磁场的特殊性：一是椭圆形基波磁场；二是级次多、幅值大的谐波磁场；三是它的效率、功率因数及力能指标均低于三相感应电动机。

如何削弱或消除低次谐波，并增大基波磁场圆度，可采用以下措施：

1）两相绕组电流的时间相位差角接近90°电角度，并且使两相磁动势安匝数接近相等。对于单绕组运行单相电动机，起动时是双绕组运行，此方法可改善起动性能。对于双绕组运行的单相电动机，可根据使用要求及技术指标，使在特定工作点上运行时基本上实现上述要求，并有最好的运行性能。主绕组、起动绕组有效匝数比 a 值的范围见表3.13-3。

表3.13-3 有效匝数比 a 值的范围

电动机类型	a 值	备 注
单相电阻起动感应电动机	0.4～0.7	功率增大，a 值取大值 a 值增加，起动绕组线径不变，则起动转矩降低，起动电流减小
单相电容起动感应电动机	0.7～1.2	功率增大，a 值取大值 a 值增加，C 不变，则起动转矩、起动电流、电容器端电压增大
单相电容运转感应电动机	1.0～1.8	功率增大，a 值取大值 a 值增加，C 不变，则起动转矩增加
单相电容起动和运转（双值电容）感应电动机	1.0～1.6	功率增大，a 值取大值

2）合理选择定、转子槽数的配合。定子槽数 Z_1 的多少对电动机的性能有直接影响。Z_1 值大时，可以获得较好的磁动势、电动势波形，改善电动机的性能，并对电机的散热有利，但同时又使槽面积利用率下降，使冲模与绕组制造加大难度，所以应综合考虑。

通过谐波分析可以选择合理的定、转子槽数的配合，能有效地消除某些级次的谐波，避免由该次谐波产生的同步附加转矩，消除“死点”，消除或削弱低次谐波力波，降低噪声。

3）合理选择转子斜槽。要消除齿谐波磁动势，转子必须采用斜槽，对斜槽的要求：一是斜槽整齐；二是斜槽度要准确。根据需要削弱的齿谐波级次计算斜槽度。

一般情况下，将转子斜一个定子槽距时，其齿谐波要比直槽时小得多。

4）降低谐波的绕组分布系数。在电机定子冲片外径不变的情况下，适当增加其槽数 Z_1，使它的每极每相槽数 q 上升，使电机绕组中奇次谐波的绕组系数减小，幅值下降，削弱谐波。

5）适当加大气隙长度 δ。可以削弱因齿槽引起的气隙磁导波，但气隙值 δ 是一个最敏感的参数，δ 增大，虽可降低谐波，也会引起其他性能的变化，如效率、功率因数、空载电流等。因此，应考虑利弊，综合权衡。

2.2 罩极电动机设计要点

1）为了提高罩极电动机的出力及改善性能，通常应合理设计凸极的形状及罩极线圈的参数，常用极间带漏磁片或极间用磁分路两种方法，可扩展主极和罩极的极弧，增大两个时间相位不同的磁通轴线空间夹角，降低两相绕组的不对称程度，同时又使空气隙趋于均匀，减少气隙谐波成分，降低因气隙不均匀而产生的磁阻转矩，使电动机性能全面提高。

2）短路环越接近纯电阻，则起动性能越好。故短路环一般只有1匝，且材料采用电阻率高的黄铜，并要适当地控制短路环的截面积。

3）改善起动性能与运行性能，对于隐极式单相罩极式电动机的主绕组，也可按正弦规律嵌放在各槽中。

2.3 电磁负荷的选择

磁负荷 B_δ 是指气隙的磁通密度的幅值，而电负荷 A 是指电机定子内圆单位周长上的电流值，单位是A/cm。由感应电动机的基本原理知道，电动机的功率因数是正比于 A，反比于 B_δ；而电动机的最大转矩是正比于 B_δ，反比于 A。很明显，功率因数与最大转矩两项性能对 A、B_δ 的要求是

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

矛盾的。

当电动机的输出功率一定时，提高电磁负荷可缩小电动机体积，节省铜、硅钢片等材料；但电磁负荷的提高受到电动机散热条件、绝缘材料耐热性能、导磁材料饱和等因素的限制，同时电动机某些性能指标将因电磁负荷的提高而变坏。又因单相电动机的负序磁场的存在，因此，必须对 A、B_δ 进行合理的选择。

(1) 磁负荷 B_δ 的选择

由于单相电动机的负序磁场的存在，磁通密度应比三相电动机的要低一些，气隙磁通密度不能选得太大，以减少因磁通密度过高而引起的噪声大、温升高等不良情况。如气隙的磁通密度太大，还会使电动机的空载电流过大，功率因数过低。

它的选择主要考虑以下几个因素：

1) 该导磁材料的导磁性能。

2) 定子齿部与轭部允许的饱和程度。

3) 电动机应有较好的起动特性与工作特性。

4) 电动机的噪声与振动应在标准允许的范围内。

(2) 电负荷 A 与电流密度 j 的选择

由于电动机的发热跟电负荷 A 和电流密度 j 的乘积成正比，因此，电负荷 A 和电流密度 j 都不应取得太大。另外，还应考虑它的冷却方式，即应考虑它的散热情况。

因单相电阻起动感应电动机和单相电容起动感应电动机的起动绕组只在起动时才接通电源，通电时间极短，所以电流密度可取得高一些；而电动机的主绕组因长期通电，电流密度应取低一些。

电负荷 A 的计算：

1) 对于电容运转电动机（假定它的两相是对称的）

$$A=\frac{2m_1WI}{\pi D_{i1}}$$

式中，m_1 为相数，这里是 2；W 为每相串联导体数；D_{i1} 为定子冲片内径；I 为每相电流。

2) 对于电容起动、电阻起动电动机

$$A=\frac{2W_mI_mZ_1}{\pi D_{i1}Z_m}$$

式中，W_m 为主绕组串联导体数；I_m 为主绕组电流；Z_m 为主绕组所占定子槽数；Z_1 为定子总槽数。

电磁负荷及电流密度的选用范围见表 3.13-4。

表 3.13-4　单相感应电动机的电磁负荷及电流密度的选用范围

电磁负荷	选用范围
气隙磁通密度（T）	0.40～0.65
定子齿磁通密度（T）	1.30～1.60
转子齿磁通密度（T）	1.30～1.60
定子轭磁通密度（T）	1.20～1.55
转子轭磁通密度（T）	0.70～1.50
电负荷（2 极电动机）（A/cm）	105～125
电负荷（4 极电动机）（A/cm）	120～165
电流密度（A/mm^2）	**选用范围**
主绕组电流密度	4～8
电阻起动电动机起动绕组电流密度	60～70
电容起动电动机起动绕组电流密度	30～50
电容运转电动机副绕组电流密度	4～8
双值电容电动机副绕组电流密度	4～8
电容运转电动机转子导条电流密度	3～5
电阻起动电动机转子导条电流密度	2～3
转子端环电流密度	(0.6～0.8)×转子导条电流密度

2.4　主要尺寸的确定

铁心的主要尺寸是指定子铁心冲片外径 D_1、冲片内径 D_{i1}、定子铁心有效长度 l 和气隙长度 δ。这几个尺寸对电动机性能的影响很大，所以如何选择这几个尺寸是电动机设计中的重要内容。

2.4.1　气隙 δ 的选择

气隙 δ 的大小直接关系到激磁电抗 X_m 的大小，对电动机的工作性能有直接的影响，例如 δ 减小时，X_m 增加，可以减少激磁电流，提高功率因数，相应地要求有效匝数比 a 下降，起动电容 C 增大。但 δ 过小，会导致电动机漏抗增加，使最大转矩、起动转矩下降，附加损耗增大，对电动机是不利的；而且，还会使加工困难。

因此，对气隙 δ 的选择，要综合考虑加工工艺的可能性及电动机性能指标的要求，另一方面还要考虑有效匝数比 a 及起动电容 C 的合理。一般情况下，气隙通常在下列范围内选取

$$\delta=0.2\sim0.3\text{mm}$$

功率较小的电机取下限，功率较大的电机取上限。

罩极式电动机的气隙比其他类型的单相感应电动机的气隙大些，常用数值为 $\delta=0.3\sim0.4$mm；对两极罩极式电动机的气隙可取 $\delta=0.5$mm。

气隙增大以后，功率因数和效率都会下降。极数越多，其影响越显著。但定、转子齿磁通脉振会减小，表面损耗及磁噪声相应减小。当电动机使用滑动轴承时，由于可能产生偏心的缘故，气隙值应增加 10%～20%。

2.4.2　定子铁心外径 D_1 与内径 D_{i1} 的选择

按照我国标准的规定，单相感应电动机的机座号（mm）有 45、50、56、63、71、80、90、100、112、132 几种规格，这就要求定子铁心冲片的外圆半径加上机壳厚度的尺寸不能大于相应机座号的中心高。为了满足电机制造中工、模具的通用性以及硅钢片的经济剪裁，定子铁心冲片的外径应选用标准值。目前采用的单相感应电动机定子铁心外径 D_1 的标准值有 $\phi45$、$\phi50$、$\phi56$、$\phi63$、$\phi71$、$\phi80$、$\phi90$、$\phi102$、$\phi120$、$\phi138$ 等几种。其机座号相对应的定子冲片外径 D_1 的参考值见表 3.13-5。

表 3.13-5　单相感应电动机机座号相对应的定子冲片外径的参考值

机座号	45	50	56	63	71	80	90
定子冲片外径（mm）	71	80	90	96	110	128	145

当定子铁心外径确定以后，根据电机内部的电磁规律知道，当定子铁心外径 D_1 固定后，定子铁心内径 D_{i1} 越大，电机可能传递的电磁功率也越大。当然，内径不可能随意增大，否则会引起定子铁心的齿部和轭部磁通密度过高，磁路过分饱和，使定子铁心中损耗增加，电机的效率降低。为保证磁通密度合理，势必要减小定子槽面积，这又会提高槽满率，造成下线困难。实践说明，定子冲片内、外径的比值有一个合理的数值范围。依据我国目前的生产工艺水平及导磁材料的性能，定子冲片内径 D_{i1} 与外径 D_1 的比值，一般在下列范围内比较合理：

2 极电机　$\dfrac{D_{i1}}{D_1}=0.5\sim0.55$

4 极电机　$\dfrac{D_{i1}}{D_1}=0.54\sim0.62$

6 极电机　$\dfrac{D_{i1}}{D_1}=0.62\sim0.70$

8 极电机　$\dfrac{D_{i1}}{D_1}=0.64\sim0.72$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.4.3 定子铁心长度 l 的确定

在单相感应电动机中，用电机的细长比 λ 表示铁心的相对长短。细长比 λ 定义为

$$\lambda = \frac{l}{D_{i1}}$$

λ 的选择对电机的运行性能、经济性和工艺性有密切关系。λ 大说明电机细长，使电机材料利用好，损耗小，效率高，起动与过载能力改善。但 λ 大又使冲片多，费工时，而且散热性能变差。再考虑到单相感应电动机气隙很小，如果转子没有足够的刚度，将会使定转子相摩擦。目前单相感应电动机的 λ 值一般在 0.75～1.4 范围内选取。在生产制造中，为了减少工、模具，对应于一种定子冲片往往有两种或三种长度的铁心。如果一种冲片有两个长度，则功率大的电机其铁心长度取 λ 的上限，功率小的电机铁心取 λ 的下限。如果一种冲片有三种长度，则功率最大的电机 λ 值将大于给出的上限。

2.5 定子绕组的设计

绕组设计时，要十分注意消除或削弱磁动势中的的高次谐波成分，这些谐波可能引起转矩曲线的显著凹坑，使起动过程中最小转矩小于负载阻力矩，使电动机只能在低速下运行，时间长了会烧坏绕组。

在电容运转式电动机中，主绕组和副绕组占有相等槽数，为 90°相带的绕组。在电阻、电容起动的单相电动机中，一般主绕组占有总槽数的 2/3，为 120°相带，起动绕组占总槽数的 1/3，为 60°相带。为了消除三次谐波磁动势，可以采用缩短 1/3 极矩的双层短矩绕组。

单层同心式绕组的线圈制造与嵌线工艺都比较简单，在单相电动机中应用最为普遍。为简化工艺，节省下线工时，也可采用集中绕组。在选择绕组时，除保证运行性能要求之外，还要考虑结构及工艺的合理性、经济性。槽满率低时，嵌线较易。为了降低漏抗，可以减小端部长度，但相应地又使嵌线困难。

除凸极式罩极式电动机的定子绕组采用集中绕组外，其他类型的单相异步电动机定子绕组都采用分布绕组。

从改善电动机性能出发，可以采用正弦绕组，以消除或削弱磁动势谐波幅值。

正弦绕组，就是使各槽内导体数在空间按余弦规律分布，从而取得接近正弦分布的磁动势波。从结构上看，正弦

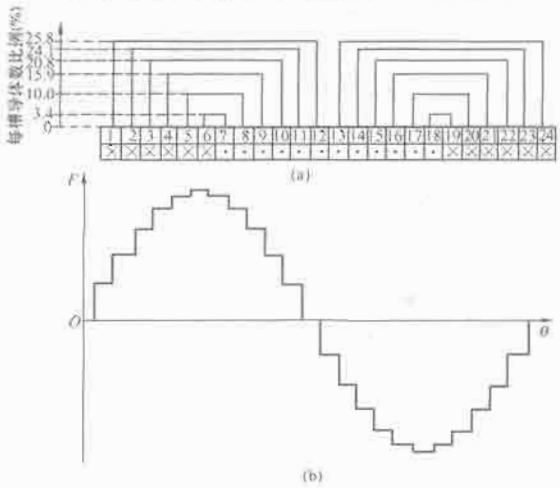


图 3.13-3 正弦绕组每槽导体数分配及磁动势空间分布
(a) 导体数分配示例；(b) 对应的磁动势空间分布
F—磁动势幅值；θ—每槽对应的电角度

绕组是一种每槽导体数不等的同心式绕组。正弦绕组每槽导体数分配见表 3.13-6。磁动势沿空间分布如图 3.13-3 所示。

表 3.13-6 正弦绕组每槽导体数分配和基波绕组系数 K_{dp1}

每极槽数	每槽导体数百分比(%) 跨槽数 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	节距数	基波绕组系数 K_{dp1}	编号
4		60.8		39.2															2.78	0.822	1
		58.6		41.4															2.83	0.829	2
6	13.5		36.5		50.0														3.73	0.776	3
		26.8		46.4		26.8													4.00	0.804	4
			42.3		57.7														4.15	0.856	5
				63.4		36.6													4.73	0.914	6
8		15.3		28.0		36.8		19.9											5.23	0.795	7
			23.5		35.1		41.4												5.36	0.828	8
				33.1		43.4		23.5											5.81	0.87	9
					45.9		54.1												6.08	0.911	10
						64.8		35.2											6.7	0.95	11
9		12.1		22.7		30.6		34.6											5.75	0.793	12
			18.5		28.3		34.7		18.5										6.06	0.821	13
				25.7		34.8		39.5											6.28	0.855	14
					34.7		42.6		22.7										6.76	0.893	15
						47.8		52.2											7.05	0.929	16
							65.3		34.7										7.69	0.961	17

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

每极槽数	每槽导体数百分比(%) 跨槽数 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	节距数	基波绕组系数 K_{dp1}	编号
12	3.4		10.0		13.9		20.8		24.1		25.8								7.59	0.783	18
		6.8		13.2		18.6		22.8		25.4		13.2							7.73	0.789	19
			10.3		16.5		21.4		25.0		26.8								7.83	0.806	20
				14.1		20.0		24.5		27.3		14.1							8.15	0.829	21
					18.3		24.0		27.8		29.9								8.39	0.854	22
						23.3		28.5		31.8		16.4							8.83	0.883	23
							29.3		34.1		36.6								9.15	0.910	24
								37.2		41.4		21.4							9.68	0.936	25
									48.2		51.8								10.04	0.959	26
										65.9		34.1							10.68	0.977	27
16			5.8		9.4		12.7		15.4		17.6		19.2		19.9				10.34	0.797	28
				7.9		11.3		14.4		17.2		18.9		20.0		10.3			10.58	0.812	29
					10.0		13.4		16.4		18.7		20.4		21.1				10.79	0.829	30
						12.4		15.7		18.5		20.5		21.8		11.1			11.14	0.848	31
							14.9		18.2		20.8		22.6		23.5				11.43	0.868	32
								17.9		21.1		23.4		24.9		12.7			11.87	0.889	33
									21.4		24.5		26.5		27.6				12.21	0.910	34
										25.7		28.5		30.3		15.5			12.71	0.928	35
											31.1		33.8		35.1				13.08	0.946	36
												38.4		40.8		20.8			13.65	0.963	37
18			4.6		7.5		10.2		12.5		14.5		16		17.1	17.8	17.6		11.58	0.794	38
				6.3		9		11.6		13.8		15.7		17				9	11.83	0.808	39
					7.8		10.6		13.2		15.2		16.8		17.9	18.9	18.5		12.01	0.820	40
						9.6		12.4		14.7		16.7		18.1				9.6	12.33	0.835	41
							11.5		14.2		16.5		18.2		19.5	20.9	20.1		12.61	0.854	42
								13.7		16.4		18.4		20.0				10.6	13.00	0.873	43
									16.1		18.6		20.8		22	24.3	22.7		13.36	0.892	44
										18.9		21.3		23.2				12.3	13.80	0.909	45
											22.2		24.6		26.2	29.9	27.0		14.16	0.927	46
												26.3		28.6				15.2	14.68	0.944	47

2.6　转子导条截面积及导条材料的选择

由电机学原理可知，转子回路电阻的大小决定了电动机转矩—转差率特性曲线，最大转矩值虽与转子回路的电阻无关，但电动机转子回路的电阻增大，使最大转矩及额定转矩对应的转差率都随之增大，也就是说，堵转转矩增大。因此，调节转子回路的电阻可使最大转矩出现在任意转差率下，所以，要根据所需要的特性来选择导条的材料或适当调整转子槽面积的大小。

3　起动开关及电容器

3.1　起动开关

如上所述，单相感应电动机可分为单相电阻起动、单相电容起动、单相电容运转、单相电容起动和运转（双值电容）和单相罩极感应电动机。除了单相电容运转感应电动机和单相罩极电动机是采用电容器和短路环来产生起动转矩外，另外三种类型的单相感应电动机均需采用起动元件来完成起动。电动机在起动开关的帮助下完成起动后，起动开关和起动绕组就完成了自己的使命，等待下一次起动。

起动开关的常闭触点串接在起动绕组电路中，再与主绕组并连接至电源，当转子转速上升到 70%～85%的额定转速时，起动开关的常闭触点会断开，将起动绕组切除，但对双值电容电动机仅切除了起动电容器，并不切除它的副绕组（起动绕组）和运转电容器。

常用的起动开关有离心开关、电磁式起动继电器、PTC 起动继电器和电子起动开关四种。

3.1.1　离心开关

（1）离心开关的基本结构与动作原理

离心开关是一种机械式的起动元件，它直接感受电动机的转速。它结构简单，价格便宜，是最常用的起动开关，对电动机的起动性能有很大影响。

离心开关由离心器和底板两部分组成，安装在电机内部（或外部）。离心器压装在转子轴上，和转子一起转动，感受电动机的转速；底板上有触点常闭开关，它安装在电机端盖上。静止时，离心器上的活络套压住底板上的簧片（也可以有其他形式），使触点闭合，起动绕组接通。起动后，转子带动离心器转动，当达到同步转速的 70%～85%时，离心器在离心力作用下足以克服弹簧力甩开，活络套离开底板，触点打开，切断起动绕组，使主绕组开始正常运行。当电动机切断电源后，由于弹簧力的作用使离心器复位，起动绕组重新接通，为第二次起动做好准备。

（2）离心开关的常用规格和选用

常用离心开关的安装尺寸如图 3.13-4 所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

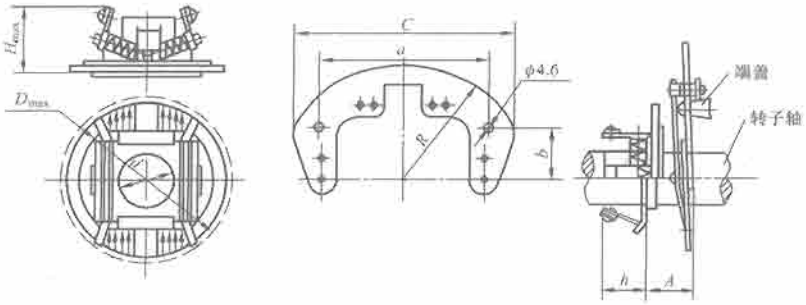


图 3.13-4 常用离心开关的安装尺寸

各种类型的电动机应根据同步转速、起动绕组的电流及其他相关尺寸来选配合适的离心开关。

(3) 离心开关的缺点

这种起动开关由于装在电机端盖内侧，不便于检查维护；如果电机过载时，转速降低（离心开关的复位转速一般比断开转速低 200～800r/min），离心力减小，离心开关可能重新把起动绕组电路接通，使起动绕组的温升过高，甚至会烧毁起动绕组；另外，它有触点，其动作时，会产生烦人的噪声。由于它的致命的弱点，已渐渐处于被淘汰之中。它主要用于电阻起动、电容起动的单相电动机。

3.1.2 电磁式起动继电器

目前使用的电磁式起动继电器有电流型、电压型和电流电压差动型三种。其中使用较多的是电流式起动继电器，由于它的结构中有一个重锤式的金属锤，所以，它又叫电流型重锤式起动继电器。它主要用在专用电动机上，例如在冰箱压缩机电动机中。

(1) 电流式起动继电器的典型结构与工作原理

这种类型的起动继电器的典型结构与尺寸如图 3.13-5 所示。起动继电器有一个产生电磁力的电磁线圈 8，它的中心有能滑动的铁心（重锤 10）以及与铁心一起运动的触桥（2 即动触点）构成。触桥随铁心的移动而使动静触点闭合或断开。所有的零件均装配在一个坚固的酚醛塑料壳体内，并采用空心结构以避免剩磁的影响。两对银铜触点产生两个断路间隙，以保证触点和起动继电器有较长的寿命。

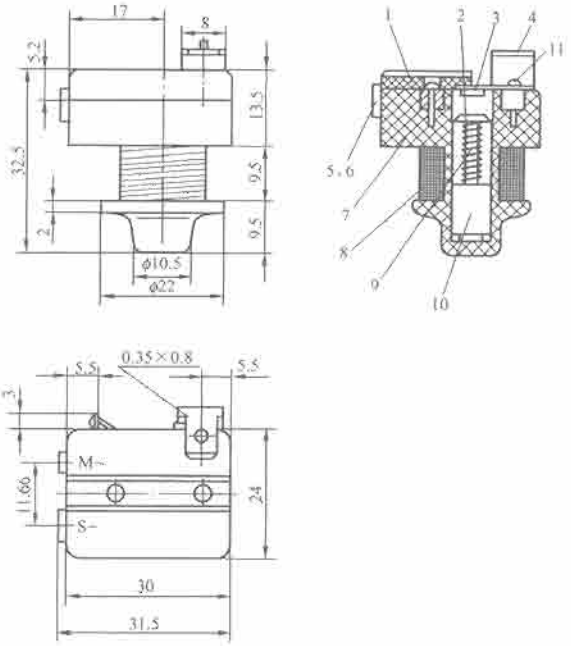


图 3.13-5 电流式起动继电器的典型结构

1—盖板；2—动触点（触桥）；3—静触点；4—端子；5、6—插孔；7—壳体；8—电磁线圈；9—弹簧；10—重锤；11—铆钉

这种类型的起动继电器有多种结构型式，20 世纪 60 年代中期之后广泛地为制冷压缩机所采用。插孔 M（主绕组）和插孔 S（起动绕组）与直径 2.26mm 插销相匹配。外接方式有：螺纹端子、偏形快插端子和带叉形接头的导线等多种。根据需要外接方式还可作各种变换。例如：采用一个短的桥形环路就能连接 1～2 个端子。在端子接插部位符合 GB 14536.1—1993 的情况下，供需双方可协商采用不同结构的外接方式。

电流式起动继电器的工作原理是利用电磁线圈对电流值的敏感，间接反应转速的起动器。在电动机的起动过程中，刚开始起动时，电动机的电流最大；随电动机转速的上升，电动机的电流下降。

电流式起动继电器的接线原理如图 3.13-6 所示，它的电磁线圈与电动机的主绕组串联，它的触点与电动机的起动绕组串联，在正常情况下它的触点是断开的。当接通电源时，主绕组流过很大的起动电流，其值常常是运行电流的 3～5倍，这样大的起动电流同时也流过串联的电磁线圈，而产生足够大的电磁力克服弹簧力，使铁心位移，带动触桥闭合，使起动绕组加入运行，产生起动转矩，使电动机得以加速。电动机起动后，随着转子转速的急速上升，流过主绕组及电磁线圈的电流逐渐减小，电磁力也随之减小。当电动机的转速接近到同步转速的 80%时，电磁力会小于起动器中的弹簧力，此时，动触点释放，断开起动绕组，完成电动机的起动过程，电动机进入正常运行。

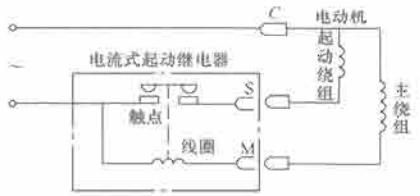


图 3.13-6 电流式起动继电器接线原理图

(2) 电流式起动继电器的基本参数

1) 吸合电流。使起动器触头由断开到闭合时的线圈电流。

2) 释放电流。使起动器触头由闭合到断开时的线圈电流。

3) 最大吸合电流。某一特定型号规格的起动器吸合电流的极限值（JB/T 6740.3—1993）。

4) 最小释放电流。某一特定型号规格的起动器释放电流的极限值（JB/T 6740.3—1993）。

5) 额定值之差值。最大吸合电流和最小释放电流之差。

6) 起动比率。主绕组在零转速下的电流对起动继电器

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

最大吸合电流的比值。

最大吸合电流和最小释放电流的偏差可根据触点容量大小选取其值为 9%～12%或 4%～6%。

额定值之差值，也可根据触点的容量大小而选定，其值为 20%或 15%。

正确地选取起动比率可减少触点的阻塞概率，延长触点寿命，保证起动器工作良好。通常按 130%～140%选取。

在 JB/T 6740.3—1993《小型全封闭制冷电动机—压缩机用电流式起动继电器》的标准中，列出了其基本规格的优选值。最小的最大吸合电流是 1.01A，最小的最小释放电流是 0.86A，最大的最大吸合电流是 24.4A，最大的最小释放电流是 20.3A。

(3) 电流式起动继电器与电动机的接线图

1) 与电阻起动感应电动机（YU）的接线如图 3.13-6 所示。采用这种起动方式，其电机起动转矩为额定输出转矩的 140%～200%，最大转矩为额定输出转矩的 200%～300%，具有中等起动转矩和过载能力。并且具有结构简单、运行可靠、起动电流大等特点。常用于家用中小型电冰箱、营业用小型陈列柜、冰淇淋机等。适宜输出功率为 40～150W。

2) 与电容起动感应电动机（YC）的接线如图 3.13-7 所示。采用这种起动方式，其电机起动转矩为额定输出转矩的 200%～350%，最大转矩为额定输出转矩的 200%～300%。具有较高的起动转矩和较大的起动电流。适用于满载起动的家用电器产品，如电冰箱、饮料器、商用冷冻柜、冷水器等。适宜输出功率为 40～300W。

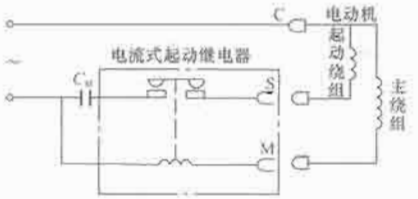


图 3.13-7　与电容起动感应电动机（YC）的接线图

3) 与电容起动运转电动机（YL 双值电容）的接线如图 3.13-8 所示。采用这种起动方式，其电机的起动转矩为额定输出转矩的 200%～350%；最大转矩为额定输出转矩的 200%～300%。具有较高的起动性能、过载能力、功率因数和效率。适用于商用大型电冰箱、家用大型房间空调器、冷水器、制冰器等。适宜输出功率为 100W～1.5kW。

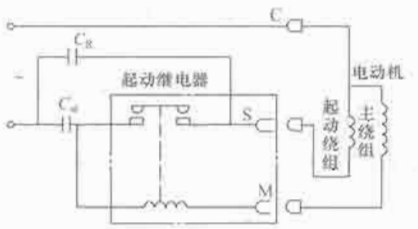


图 3.13-8　与电容起动运转电动机（YL）的接线图

(4) 电流式起动继电器的选用

选用电流式起动继电器的最大吸合电流必须小于电动机的最大吸合电流，继电器的最小释放电流必须大于电动机的最小释放电流，这样，才能确保继电器可靠地工作。取得上述电动机的参数后，再从 JB/T 6740.3—1993 标准中列出的基本规格中选用合适的继电器。

另外，还应根据匹配电动机的大小，注意选用的继电器的触头容量与安装型式是否满足要求。它的插拔力是否符合标准，标准规定，对于两极插孔，其插入力应小于 90N，拔出力应大于 25N。标准还规定继电器的触头在 8A 的容量下，其电寿命应不低于 30 万次。这 30 万次意味着，该制冷压缩机连续工作 15 年以上，继电器依然还能正常工作。

总之，在选用继电器的规格之后，还应注意该继电器是否符合 JB/T 6740.3—1993 的其他要求，只有符合该标准的继电器，才是安全、可靠的继电器。

(5) 电流式起动继电器的缺点

它的动静触点在通电前是打开的，当接上电源时，主绕组流过的冲击大电流也流过起动继电器的线圈，因而产生足够大的电磁力克服弹簧力而使触点闭合，使电动机起动运转。此时可能出现动静触点间的反弹断开，或起动结束复位断开时，动静触点间将会产生较大的电弧，特别在电容运转或双值电容的电动机中，由于已被充电的运转电容器的存在，触点将此电容器短接，因此，动静触点分离时，将会产生较大的电弧，使动静触点产生熔化，有被黏住的可能，此时如动静触点之间不能分离从而使电容器短接，其后果十分危险，甚至会烧毁起动绕组。

3.1.3　PTC 起动继电器

PTC 起动继电器的全名应是正温度系数热敏电阻起动继电器（Positive Temperature Coefficient of Resistence Start relays），下面简称为 PTC 起动器。

PTC 起动器是一个耐热酚醛塑料壳体内在带有插座的弹性接触电极之间，装有 PTC 元件，通过与接触电极相连接的插孔和外电路相接。PTC 元件它是由多晶钛酸钡陶瓷经过掺杂、烧结制成的半导体元件，常温电阻一般在 10～100Ω 的范围内。

(1) PTC 起动器的工作原理

PTC 起动器主要是利用其中的 PTC 元件的电阻—温度特性，图 3.13-9 是它的电阻-温度特性曲线。

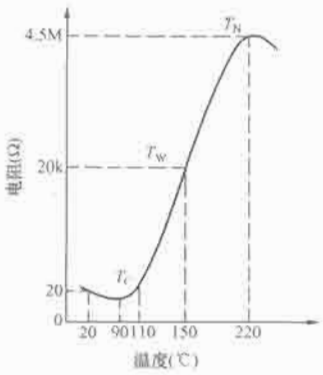


图 3.13-9　PTC 的电阻—温度特性曲线

从图 3.13-9 中可以看出，当 PTC 元件在常温或居里点温度 T_C 以下时，电阻值较低，通常为 10～100Ω；当温度升至居里点以上时，其电阻值迅速增加，在到达工作温度 T_W 时，电阻值达几十千欧姆以上，与起动绕组的阻抗比相当于开路。因此它可以作为起动继电器用于电动机的起动。

PTC 起动器不是依靠触点动作而是依靠电阻值的高低来转换电动机工作状态的。

因电容运转电动机有较高的效率与功率因数，故它的应用范围最广，它的原理接线图如图 3.13-10 所示。电动机刚通电时，由于 PTC 起动器的常温电阻值很低，一般是 10～100Ω，相当于把运转电容器 C 短路，使电动机暂时成为电阻起动的电动机，具有较好的起动性能。流过 PTC 起动器的电流产生焦耳热，使其本身的温度升高，在达到和超过其居里温度 T_C 时，PTC 起动器的电阻值就突然变大，一般达 30kΩ 以上，相当于“此路不通”。使起动绕组与运行电容器串联，电动机进入电容运转的正常工作状态。这种配合的电动机就叫“电阻起动-电容运转”的电动机。它很好地避免了它们各自的缺点，而发挥了它们各自的优点，既有较好的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

起动性能，又有较好的运行性能。

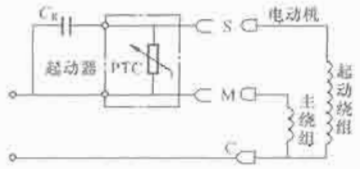


图 3.13-10 电阻起动电容运转原理接线图

同样，PTC 起动器也适用于电容起动单相运转的电动机，接线原理图如图 3.13-11 所示；电容起动电容运转（双值电容）的电动机的接线原理图如图 3.13-12 所示；电阻起动单相运转的接线原理图如图 3.13-13 所示。

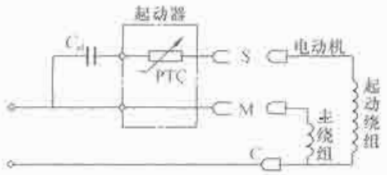


图 3.13-11 电容起动单相运转的原理接线图

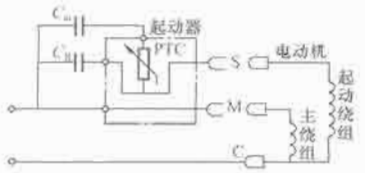


图 3.13-12 电容起动运转原理接线图

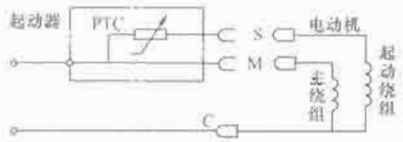


图 3.13-13 电阻起动单相运转的原理接线图

(2) PTC 起动器的术语与基本参数

1) 常温电阻值。它是 PTC 起动器在 25℃时的零功率电阻值。它与电动机的起动绕组的阻抗一起决定电动机起动电流的大小，是电动机起动性能的重要参数之一，一般是 10～100Ω 之间，因电动机的不同需选用不同的规格。选择的目的就是使电动机有足够大的起动电流与起动转矩。

2) 额定常温电阻值。制造厂对 PTC 起动器规定的常温电阻值。

3) 动作时间。在 25℃时，PTC 起动器自电流接通时起，到流过起动器的电流从最大值下降到 0.5 倍最大值时起止的时间。它是起动器性能的又一重要参数，它必须与电动机的起动过程相匹配。这个时间太长或太短，都会对电动机产生不良影响。假如动作时间过长，电动机起动已经完成，而 PTC 起动器仍未“断开”，运行电容器相当于短接，电动机会过热。若动作时间太短，电动机起动过程尚未结束，起动器就“开路”了，可能会导致电动机停转或延长起动过程。

4) 恢复时间。在 25℃时，PTC 起动器在最大工作电压下的稳定状态断电时起，到电阻值下降到常温值的 2 倍时止的时间，即从高阻值转换到低值所需要的时间。这也是 PTC 起动器重要的参数，它不但取决于 PTC 起动器的温度、质量，以及机壳的散热情况，还与环境温度有关。在电动机起动之前，PTC 起动器必须冷却，并低于自己的居里温度，把电阻值降到低阻值，才能顺利起动。PTC 起动器的这一特性刚好与制冷压缩机断电停机后，不能立即起动的特性相适应。一般要求 PTC 起动器的恢复时间应略大于制冷压缩机从高压转换到低压所需的时间，这并不意味着恢复时间越长越好，标准规定恢复时间应小于 80s。

5) 最大工作电流。PTC 起动器在使用温度范围内，施加最大工作电压时允许通过的最大电流。

6) 短时过电压。PTC 起动器短时能承受的超过最大工作电压的电压值。它应大于起动绕组在起动过程中的最大电压值。

7) 耗散功率。在 25℃时 PTC 起动器在常温下施加最大工作电压时的稳定工作状态下的消耗功率。

表 3.13-7 列出，我国行业标准 JB/T 6740.2—1993 中优选的 PTC 起动器的基本参数。

(3) PTC 起动器的缺点

这种起动器的缺点是因起动绕组电路中始终串联了 PTC 电阻，影响了起动性能，其次是需考虑元件的冷却时间（约 2min），不宜用在起动次数太频繁的场合。

3.1.4 电子起动开关

电子起动开关是由舌簧开关、时限控制器、转速传感器、霍尔传感器等组成，结构复杂，价格较贵，目前尚未大量推广应用。

3.2 电容器

单相电容起动电动机需要起动电容器，电容运转电动机需要运转电容器，双值电容电动机需要起动电容器及运转电容器。

起动电容器的选配除应使电动机达到技术条件规定的起动转矩外，必须保证起动过程中电容器两端电压不超过其允许的最高电压值（约为 1.25 倍额定工作电压）；运转电容器的选配应保证电动机从空载到满载运行时电容器端电压都不超过其额定工作电压。电容量选配推荐值见表 3.13-8。常用电容器的交流电阻和电抗（f=50Hz）见表 3.13-9。

表 3.13-7 PTC 起动器的基本参数

额定常温电阻值（Ω）	最大工作电压（V）	最大工作电流（A）	动作时间（s）	恢复时间（s）
10±20%	260，300	9	0.1～1.0	<80
15±20%	260，300	8	0.1～1.2	<80
22±20%	260，300，340	7	0.12～1.35	<80
33±20%	260，300，340	6	0.4～1.35	<80
47±20%	260，300，360	5	0.4～1.5	<80
68±20%	260，300，340，360	4	0.5～2.0	<80
100±20%	340，360，410	2.5	1.2～3.0	<80

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3.13-8　　电容量选配推荐值（220V，50Hz）

电容起动电动机	额定功率（W）	120	180	250	370	550	750	1100	1500	2200	—
	起动电容量（μF）	75	75	100	100	150	200	300	400	500	—
电容运转电动机	额定功率（W）	6	10	16	25	40	60	90	120	180	250
	运转电容量（μF）	1	1	2	2	2	4	4	4	6	8
电容起动和运转（双值电容）电动机	额定功率（W）	250	370	550	750	1100	1500	2200	3000	—	—
	起动电容量（μF）	75	75	75	75	100	200	300	300	—	—
	运转电容量（μF）	12	16	16	20	30	35	40	50	—	—

表 3.13-9　　常用电容器的交流电阻和电抗（f=50Hz）

电容量（μF）	1	2	3	4	5	6	8	10	75	100	150	200
电阻（Ω）	20	16	15.5	15	14.5	14	13	12	4.3	3.2	2.2	1.6
电抗（Ω）	3180	1590	1060	795	637	530	396	318	42.5	31.8	21.2	15.9

4　热保护器

4.1　概述

热保护器是一种当被保护的电机电器发生故障，若出现过热等非正常状态时，能够自动动作，保护电机免受损坏的器件。

电机在运行过程中会产生两种类型的热过载，即慢变化热过载和快变化热过载。而两种热过载型式均会使电机的绝缘过早地加速老化，降低使用寿命。一般情况下，当电机过载连续运行温升每增加 8～10K 时，电机绕组绝缘的有效寿命将降低 1/2。

为有效地防止电机绕组的过早老化，保证电机的“正常”寿命，除了对电机的正确选用、维护外，还必须对电机的超过正常温度加以限制或控制，以确保电机在遇到慢变化热过载或快变化热过载的情况下，得到及时有效的保护。

目前，双金属片式温度电流型热保护器对电机的快变化热过载和慢变化热过载都有很好的跟随性，对电机的断相、过载、堵转等有着可靠的保护作用，其保护性能较好，价格适中，是目前中小型电机、小功率电机（包括单相感应电动机）保护设计中普遍采用、较为理想的保护方式。

4.2　热保护器的一般结构与工作原理

图 3.13-14、图 3.13-15 为双金属片式温度电流型热保护器的一般结构示意图。图 3.13-15 的热保护器（无加热丝）是由双金属片、焊接在双金属片上的触点、底板触点、镀镍底板、绝缘垫、引线端子及外壳组成。

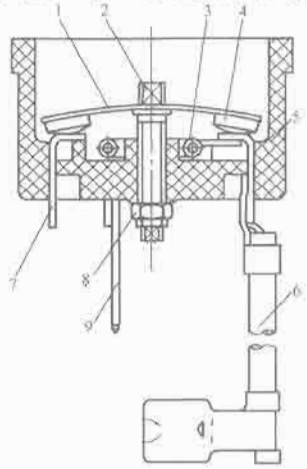


图3.13-14　热保护器典型结构之一（有加热丝）
1—碟形双金属片；2—调整螺钉；3—加热丝；4—动触点；5—壳体；6—插孔导线；7—固定电极；8—螺母；9—快接插片

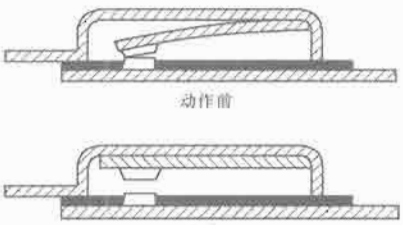


图 3.13-15　热保护器典型结构之二（无加热丝）

安装于被保护系统中的温度电流综合型热保护器，当流过双金属片的电流和安装位置处的温度达到产品设定的动作温度时，热保护器自动动作，切断电路起到保护作用；当电机冷却至正常工作温度时，热保护器又自动复位电路接通。它是一种多次性和可复性的热保护器（亦有按特殊要求设计成手动复位的热保护器）。

热保护器接线原理图如图 3.13-16 所示，在接有热保护器的电动机回路中，当温度或电流升高时，热量传到双金属片，当双金属片达到预先设定的断开温度时，便迅速动作而切断电路；当温度下降到复位温度时，双金属片又会迅速闭合接通电路。在所要求的循环寿命中，它能达到持续可靠的工作目的。

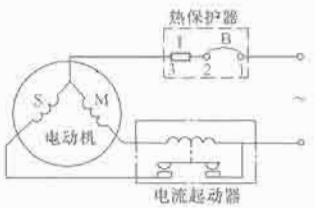


图 3.13-16　热保护器接线原理图
B—碟形双金属片；T—加热丝；M—主绕组；S—起动绕组；1、2、3—热保护器结点代号

4.3　热保护器的选用及注意事项

（1）热保护器选用原则

对许多设计和制造相似的电机，当采用同样类型的热保护器时，可以减少重复试验。这只能由电机制造厂考虑，规定一套程序以选用性能合适的热保护器。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

(2) 注意事项

1) 热保护器无论是用于直接保护（内藏式）还是间接保护（外附式），外壳均应具有足够的强度、刚度、绝缘和耐热特性，与电机绕组具有良好的耦合性能，承受可能遇到的诸多应力，而不改变其动作特性。即使这样，也应注意不要使热保护器外壳发生变形，导致热保护器动作特性变化。

2) 热保护器安装时应将感温面贴向绕组，以改善热传导。

3) 被保护电机的额定电流小于热保护器的额定电流时，可将热保护器直接接入电源回路中。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 14 章　规定用途和特殊用途单相感应电动机

1　风扇电动机

1.1　分类与技术要求

电风扇一般由扇头（电动机及摇头机构）、扇叶（风叶及叶片支架）、底座、调速开关以及网罩等组成。风扇电动机作为扇叶的驱动部件，直接用来驱动风扇的扇叶工作。

尽管风扇种类繁多，但由于风扇负载的特点，对风扇电动机的过载能力和起动转矩要求都不高，故电动机多采用性能优良、体积较小的单相电容运转感应电动机，也有采用结构相对简单、成本相对较低的罩极感应电动机。除使用单相感应电动机外，还有为适应车船用电而采用的直流电动机，以及电子设备中常用的无刷直流电动机，而工业风扇一般采用三相感应电动机。

电风扇的主要类型、规格、特征及所选用的电动机见表 3.14-1。

1）负载特点。风扇电动机的直接负载是扇叶，扇叶作为负载要考虑其机械特性和功耗特性。扇叶的机械特性指驱动扇叶旋转所需转矩与对应的转速关系。一般而言，扇叶的阻转矩近似与转速的二次方成正比，其机械特性接近二次曲线。功耗特性指驱动扇叶所耗用功率与相应转速的关系。耗用功率近似与转速的三次方成正比。

根据扇叶的机械特性，风扇电动机需要的起动转矩和过载转矩都不大。为了电动机获得较高的运行效率，要求电动机在接近额定负载时，磁场近似为圆形旋转磁场，同时根据扇叶的功耗曲线选配电动机的功率和转速。如果选用电动机功率太大，风扇转速过高，则电动机效率降低，噪声也相应增大；如果功率太小，风扇转速过低，不但风量达不到标准值，电动机效率也可能比额定设计值低，达不到节能的效果。因此，扇叶特性必须与电动机相匹配。

2）能效值。在现行的国际标准和国家标准中，已使用“能效值”代替原来的“使用值”这一术语来表述风量与输入功率的关系。风扇的能效值定义为：在额定电压、额定频率和最高转速档运转时，风扇实测的输出风量（m^3/min）除以实测的电动机输入功率（W）所得比值。这个能效值表征风扇在单位电功率消耗下所输出的实际风量。各种风扇所要达到的最小能效值可参照国家标准 GB/T 13380《交流电风扇和调速器》的规定。

3）转速。在实际使用中，风扇负载通常都是直接驱动，因此，扇叶的转速也就是风扇电动机的转子转速，这个转速主要由电动机的转差率决定，但同时也要受扇叶最大圆周速

表 3.14-1　　电风扇的类型及所选用的电动机

风扇类型	风扇规格（以扇翼直径表示）(mm)	特　征	选用电动机类型	电动机极数
台扇、壁扇、台地扇	200，230	台扇置于台上使用，壁扇安装于壁上使用，两者扇头均可作 60°～90°回转；台地扇可放于台上或地上，扇头高度可调节	罩极感应电动机	2
	250，300		罩极感应电动机 单相电容运转感应电动机	2 2，4
	350，400，450		单相电容运转感应电动机	4
落地扇	300，350，400，450，500，600	一般置于地上，扇头可作 60°～90°回转	单相电容运转感应电动机	4
吊　扇	900，1050	悬吊式，不摇头	罩极感应电动机 单相电容运转感应电动机	12，14
	1200		单相电容运转感应电动机	16，18
	1400			16，18，20
	1500			18，20，22
	1800			22，24，26
顶　扇	300，350，400，450	置于天花板上，扇头可作 360°回转	单相电容运转感应电动机	4
转页扇	200，230，250，300，350，400	除扇叶之外，另有独立的转页，用于定向或改变气流方向	单相电容运转感应电动机	4
换气扇	150，200，250	安置于墙上或窗上，不摇头	罩极感应电动机	2
	300，350		单相电容运转感应电动机	4
	400，500，600，750		单相电容运转感应电动机 三相感应电动机	4，6

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

度及风扇噪声的限制。一般规定，台扇扇叶最大圆周速度限值为2150m/min，而吊扇为1500m/min。因此，在实际设计中，要根据风扇的类型及规格选择电动机的极数，各种类型和规格的电风扇所采用的感应电动机的极数见表3.14-1。

事实上，决定转速大小的转差率会因电动机的实际使用情况而略有差异。一般地，对要求调速的电动机，其转差率在0.1～0.2之间；不调速的排气扇电动机的转差率在0.04～0.10之间；罩极感应电动机则在0.3左右。

4）调速比。实际使用中，风扇电动机一般都要求带有调速的功能。电风扇的调速比是指其在额定电压和额定频率下最低转速档与最高转速档的转速之比。各类电风扇的调速比可参照国家标准GB/T 13380《交流电风扇和调速器》的规定。

5）冷却特点。由于扇叶负载通风散热的特点，电动机在工作过程中，扇叶运转所形成的空气循环对电动机有良好的散热作用，能有效降低绕组和外壳的温升。

虽然风扇电动机的正常运转中温升都不太高，但从安全角度出发要考虑：当扇叶负载被堵转的情况下，电动机不能出现绕组温度过高及绝缘烧损的问题。因此，除某些功率较低的电动机由于具备阻抗保护的能力，可以不安装热保护装置之外，一般要在电动机绕组上安装热保护器，并且一般使用可复位型的热保护器。热保护器一般安装在绕组的公共引出端上，当保护器动作后，可同时切断主、副绕组和调速绕组的供电。

6）安全性能。从保护人们生命财产安全的角度考虑，风扇电动机的安全性能对电风扇的正常使用最为重要，同时也是最基本的要求。在国家目前推行的关于小功率电动机的强制性产品认证中，包含针对风扇电动机的认证要求。

在我国，安全认证所依据的检测标准是GB 12350《小功率电动机的安全要求》。在该标准中，同时要引用到GB/T 5171《小功率电动机通用技术条件》、风扇电动机的产品标准GB/T 5089《交流电风扇电动机通用技术条件》、JB/T 9541《家用换气扇用电动机技术条件》以及电风扇安全标准GB 4706.27《家用和类似用途电器的安全　电风扇的特殊要求》的相关规定等。

1.2 结构与技术数据

（1）台扇电动机

交流台扇电动机指驱动台扇（包括壁扇、台地扇、落地扇）扇叶用的交流电动机，是连接头以上除连杆、外罩、扇叶网罩、扇叶以外的机头部分。该类电动机一般由定子、转子、前台端盖、摇头机构、平衡块、齿轮减速箱及前后罩等部分组成，其主要部分的结构如图3.14-1所示。

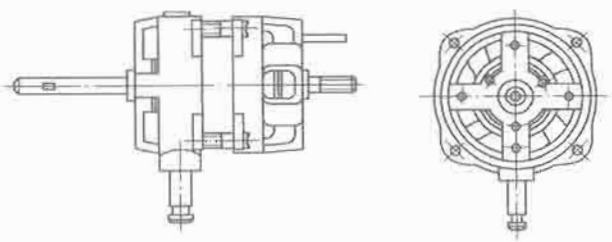


图3.14-1 台扇电动机

实际应用中，扇叶直径250mm以上的台扇多采用单相电容运转感应电动机，而以下者多采用单相罩极感应电动机。

台扇用罩极电动机的定子和转子结构与普通罩极电动机相同，并多采用2极结构。考虑到噪声和调速的要求，其转差率较普通罩极电动机的大，一般在0.27～0.40之间，其转子电阻也相应大些。

台扇用罩极感应电动机的铁心尺寸与绕组数据见表3.14-2。

台扇用单相电容运转感应电动机的定子槽数一般有8、12、16等三种。根据绕组的型式和分布情况，定子槽形有同形槽和异形槽两种。定子绕组多采用单层同心式或双层叠绕式。主绕组和副绕组的匝数比一般为1.4～1.7。转子为铸铝笼型，斜槽。转轴通常为无台阶光轴，直径有7.8mm和8mm两种，轴的一端安装扇叶，另一端为蜗杆，用于驱动摇头机构。为满足调速的要求，转子电阻比通用电动机要大些，转差率一般在0.13～0.18之间。

台扇用电容运转感应电动机铁心尺寸数据见表3.14-3，绕组数据见表3.14-4。

（2）吊扇电动机

吊扇电动机为驱动吊扇扇叶用的电动机，通常采用罩极感应电动机和单相电容运转感应电动机两种类型。电动机常见为立式悬吊安装，称为扇头。悬吊装置的强度一般应能承受9800N的拉力和49N·m的转矩而不断裂。电动机的引出线通过钢管制的吊杆引出，吊杆与电动机的连接方式一般有螺纹联接和销钉联接两种。

在实际使用中，吊扇电动机多为外转子式结构。电动机定子通过托架与悬吊杆固定；转子与上下盖固定成一个整体，上盖作径向定位和压紧转子之用。上下盖均装有轴承以支承整个扇头。扇叶安装在上盖外侧。当风扇工作时，扇叶、上下盖与转子一起旋转，而定子固定不动。

由于吊扇电动机的极数较多，因此，每极每相槽数通常都为1。一般的，绕组极相组之间的连接方法有庶极接法和显极接法两种。其中，庶极接法是所有的极相组线圈都围绕着同一极性磁极，线圈绕向相同，绕组每相的极相组数只是极数的一半，相邻两个极相组线圈首尾依次相接。这种接法嵌线相对简单、连接方便，但当电动机极数较少时，绕组散热困难。显极接法是相邻两个极相组线圈围绕着不同极性磁极，极相组间反接串联，绕组每相极相组数等于磁极数。这种接法电动机运行性能较好，但嵌线接线都较慢。

目前，吊扇使用较多的依然是单相电容运转感应电动机，其定子绕组大多使用显极接法。主副绕组的匝数比一般为1.4～1.7。

吊扇电动机铁心尺寸见表3.14-5，绕组数据见表3.14-6。

（3）转页扇和换气扇电动机

转页扇电动机和换气扇电动机大多采用4极电容运转感应电动机。这两种风扇电动机的结构和外形基本相同。它们都由定子、转子及前、后端盖组成。其中，前、后端盖一般由0.8～1.2mm厚的薄钢板冲制而成，它们既作为电动机转子的支架，又作为固定电动机定子铁心的外壳。轴承一般使用圆柱形或球形铜基（或铁基）含油轴承。圆柱形含油轴承对加工同心度要求高，且装配较困难，但稳定性好，使用寿命较长；而球形含油轴承能自动调整中心，便于装配，但缺点是稳定性差，寿命相对较短。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3.14-2　　台扇用罩极感应电动机的铁心尺寸与绕组数据（220V，50Hz）

序号	风扇规格（mm）	极数	定子铁心					转子槽数	定子绕组			调速方法
			外径（mm）	内径（mm）	长（mm）	气隙（mm）	槽数		线规（mm）	线圈个数×每极匝数	线模尺寸（长×宽×厚）（mm）	
1	200	2	60	30	25	0.35	4	15	0.17	2×1270	34×34×7	电抗器
2	200	2	59	28	32	0.35	4	15	0.19	2×(800+500)	42×30×5	抽头
3	300	4	88	44.7	32	0.35	8	17	0.27	4×510	40×27×6	电抗器
4	400	4	108/95.7	51	22	0.35	8	22	0.47	4×450	40×31×10	电抗器

表 3.14-3　　台扇用电容运转感应电动机铁心尺寸（220V，50Hz）

序号	风扇规格（mm）	极数	定子铁心					转子铁心	
			外径（mm）	内径（mm）	长（mm）	气隙（mm）	槽数	外径（mm）	槽数
1	250	4	88	44.7	20	0.35	8	44	17
2	300	4	88	44.7	26	0.35	8	44	17
3	300	4	78	44.5	24	0.35	16	43.8	22
4	350	4	88.5	49	23	0.35	16	48.3	22
5	400	4	88.5	49	35	0.35	16	48.3	22
6	400	4	88.4	49	32	0.35	16	48.3	23

表 3.14-4　　台扇用电容运转感应电动机绕组数据（220V，50Hz）

序号	风扇规格（mm）	主绕组		副绕组		电容量（μF）	调速方式	转子轴径（mm）
		线规（mm）	线圈数×每槽匝数	线规（mm）	线圈数×每槽匝数			
1	250	0.17	4×935	0.15	4×1020	1	电抗器	—
2	250	0.17	4×850	0.15	2×(1020+800)	1	抽头	—
3	300	0.17	4×800	0.15	4×1000	1	抽头	8
4	300	0.21	4×710	0.17	4×935	1	电抗器	8
5	350	0.21	4×720	0.17	4×930	1.2	电抗器	—
6	350	0.19	4×760	0.19	4×960	1.2	抽头	—
7	400	0.23	4×570	0.19	4×720	1.2	电抗器	8
8	400	0.21	4×540	0.19	4×700	1.2	抽头	8

表 3.14-5　　吊扇用电动机铁心尺寸（220V，50Hz）

序号	风扇规格（mm）	电动机类型	极数	定子铁心					转子铁心	
				外径（mm）	内径（mm）	长（mm）	气隙（mm）	槽数	外径（mm）	槽数
1	900	罩极式电动机	12	123	51	30	0.3	24	50.4	57
2	900	电容运转感应电动机	14	118	—	23	0.25	28	145	45
3	1200		18	134.75	70.5	25	0.25	36	162	48
4	1400		18	138.8	60	28	0.25	36	164.5	48
5	1400		18	136.6	63.5	32	0.5	36	165.7	48

表 3.14-6　　吊扇用电动机绕组数据（220V，50Hz）

序号	风扇规格（mm）	电动机类型	主绕组			副绕组			电容量（μF）	调速方式
			线规（mm）	线圈数	每槽匝数	线规（mm）	线圈数	每槽匝数		
1	900	罩极式电动机	0.38	6	550	—	—	—	—	电抗器
2	900	电容运转感应电动机	0.23	14	191×2	0.19	14	253×2	1	无
3	1200		0.27	18	140×2	0.25	18	164×2	2	电抗器
4	1400		0.29	18	118×2	0.25	18	162×2	4	电抗器
5	1400		0.31	18	220×2	0.25	18	310×2	2	无
6	1400		0.27	18	280×2	0.25	18	330×2	2.4	电抗器
7	1400		0.29	18	240×2	0.27	18	300×2	2	电抗器

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

转页扇和换气扇电动机一般都采用同心式绕组，主、副绕组的匝数比一般在1.3～1.7之间。在调速方面，两者略有不同：转页扇有调速要求，一般装有三档转速的调速绕组；换气扇没有调速要求，但部分换气扇要求有送风和排风两种工作状态，如此，电动机设计的主、副绕组基本相同，通过开关换接主绕组或副绕组的首尾端实现两种转向的转换。

由于使用场合和使用条件的不同，换气扇有不同的结构型式，如敞开式、百叶窗式、或在扇上加装抽风管道等。由于结构上的差异，风扇的运转性能将受到直接影响。为了满足所配套风扇的具体要求，换气扇电动机的转差率一般设计在0.1～0.34之间。

1.3 调速方法

电风扇通常采用调节电动机转速的方法来改变扇叶所产生的风压、风量和风速，以达到不同的通风效果，满足不同对象与场合的需要。实际应用中，风扇电动机大多数采用调压调速方式，其次是变极调速方式与变频调速方式。其中，调压调速又有定子绕组线圈抽头调速、串联电抗器调速、串联电容器调速、晶闸管调压调速、自耦变压器供电调速等型式，各种调速方式的接线原理、特点以及应用见表3.14-7。

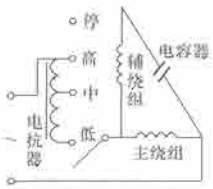
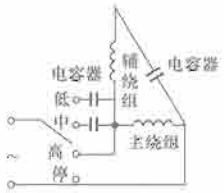
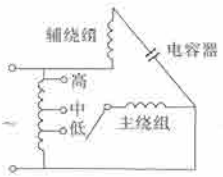
2 洗衣机电动机

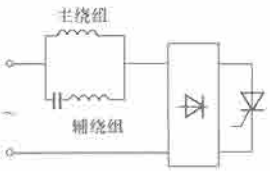
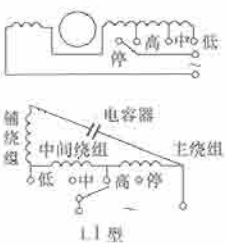
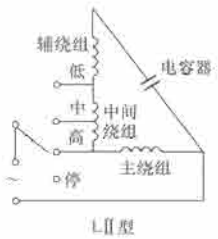
2.1 分类与技术要求

目前我国的家用洗衣机主要有普通型波轮式、全自动波轮式、滚筒式洗衣机和脱水机。根据洗衣机负载的特点，波轮式洗衣机配用的电动机大都为电容运转感应电动机，而滚筒式洗衣机大多采用变极双速电容运转电动机、直流无刷电动机以及串励电动机。

通常，所选用电动机的功率依据洗衣机的规格，即洗涤容量而定。对单桶或双桶普通波轮式洗衣机，其电动机功率选配见表3.14-8。一般地，对效率高的洗衣机可选用较小功率的电动机，而全自动波轮式洗衣机用电动机的功率多为120～180W。

表3.14-7 风扇电动机的调速原理及接线原理、特点

原理	改变绕组端电压		
方法	串联电抗器	串联电容器	自耦变压器供电
接线图			
特点	调节电抗值，以改变电路参数达到调速目的。调速范围大，电机简单，但功耗大，成本高，低速性能差	调节电容值，以改变电路参数，达到调速目的。方法简单，调速后起动性能好，损耗小，但需两个电容器	调节自耦变压器抽头，改变供电电压。调节范围大，调速后效率高，起动性能好，运行费用低，材料和工时稍有增加
应用	台扇、吊扇电动机	台扇、吊扇、转页扇电动机	空调器风扇电动机

原理	改变绕组端电压			
方法	晶闸管调压	定子绕组抽头调速		
接线图		 LⅠ型		 LⅡ型
特点	利用晶闸管调压，调速范围宽，无级调速，可低速模拟自然风；但电压波形差，电机噪声大，成本较高，经济性差	改变定子磁极线圈抽头来改变匝数	中间绕组嵌在主绕组槽内，低速时串入主绕组电路，高速时串入副绕组电路。低速起动性能好，输入功率大，调速范围小	中间绕组嵌在副绕组槽内，低速时串入主绕组电路，高速时串入副绕组电路。低速起动性能好，输入功率大，调速范围小
应用	台扇、吊扇、转页扇电动机	罩极电动机	台扇电动机	各类风扇电动机

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

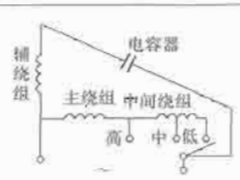
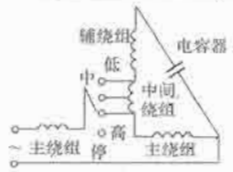
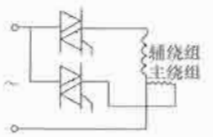
原理	改变绕组端电压			改变供电频率
方法	定子绕组抽头调速			用分数倍频器改变供电频率
接线图	 L Ⅲ型	 T Ⅰ型	 T Ⅱ型	
原理	改变绕组端电压			
特点	中间绕组在主绕组槽内，低速时串入主绕组电路，高速时被切除。低速起动性能好，设计合理时各档的运行性能好，但功耗大	中间绕组放在主绕组槽内或副绕组槽内，或同时分布于主、副绕组槽内。低速时，中间绕组串入主、副绕组并联后的电路中，高速时被切除。性能好，功耗低，但低速起动性能较差	中间绕组放在副绕组槽内，主绕组分两部分，低速时中间绕组的一部分与主绕组串联，高速时与副绕组串联，各转速档运行性能好，调速效果好，低速起动性能差	低速节能，成本高
应用	台扇电动机	台扇电动机	台扇电动机	轴流风机、空调器风扇、台扇电动机

表 3.14-8　　洗衣机电动机功率选配

洗涤容量（kg）	1.5～2	2.5～3	3.5～4	4.5～5	6
配用电动机（W）	50～60	75～90	95～120	135～150	180
配用电容量（μF）	5，6	8，9	9，10	10，12	15

1）负载特点。根据洗衣机负载转矩出现无规律周期性波动和冲击的特点，电动机要有足够的瞬时过载能力；同时，电动机需要足够的电磁转矩，用来克服传动带轮组件和传动系统的摩擦转矩，以及波轮、洗涤物、洗涤桶和洗涤液相互间的摩擦阻转矩；此外，为满足洗衣机满载快速起动的特点，电动机还需要足够的与驱动系统惯量有关的加速转矩。

洗衣机工作时，其对电动机的阻转矩一般呈现为无规律、周期大约为 2～6s 的波动，并不时夹杂着持续时间为 0.1～1s 的较大的短时冲击阻转矩。因此，为了保证洗衣机在出现瞬时过载时仍能正常工作，并能使洗涤物连续翻转，要求电动机有足够大的最大转矩。同时考虑到在最坏的条件下，供电电压为额定电压的 85%以及电容量偏差为－10%时，洗衣机仍能正常工作，故要求电动机的最大转矩对额定转矩之比应大于 1.5 倍或更大。

通过以上分析可知，洗涤用电动机的主要技术指标为堵转转矩和最大转矩，为了满足实际需求，电动机必须具有足够大的堵转转矩和最大转矩，以及较小的堵转电流。

2）安全性能。从保护人们生命财产安全的角度考虑，洗衣机电动机的安全性能对洗衣机的正常使用最为重要，同时也是最基本的要求。在国家目前推行的关于小功率电动机的强制性产品认证中，包含针对洗衣机电动机的认证要求。

在我国，安全认证所依据的检测标准是 GB 12350《小功率电动机的安全要求》。在该标准中，同时要引用到 GB/T 5171《小功率电动机通用技术条件》、洗衣机电动机的产品标准 JB/T 3758《家用洗衣机用电动机通用技术条件》以及洗衣机安全标准 GB 4706.24《家用和类似用途电器的安全　洗衣机的特殊要求》的相关规定等。

2.2　结构与技术数据

（1）波轮式洗衣机用电动机

普通波轮式洗衣机所用的电动机是单相四极电容运转感应电动机。电动机以端盖平面安装，经传动带传动使得洗衣机波轮以一定的转速旋转，推动洗涤物和洗涤液不断翻滚和摩擦，进行衣物的洗涤。

目前，国内所生产的波轮洗衣机大多仍然使用 XD 型电动机。XD 型洗衣机电动机是洗衣机专用的单相四极电容运转感应电动机，结构为开启式，自冷或自扇冷。这种电动机的定子和笼型转子，与一般单相电容运转感应电动机相似。但主绕组和副绕组两者的匝数和线径相同，使得正转和反转时电动机性能相同且易于控制。电动机的定子铁心多为方形或圆角方形，无外壳，由铝合金压铸或由铜板拉伸成型的两个前后端盖，用螺栓拉紧，前端盖上有安装孔。电动机适宜于立式安装，无底脚。XD 型洗衣机电动机结构如图 3.14-2 所示。

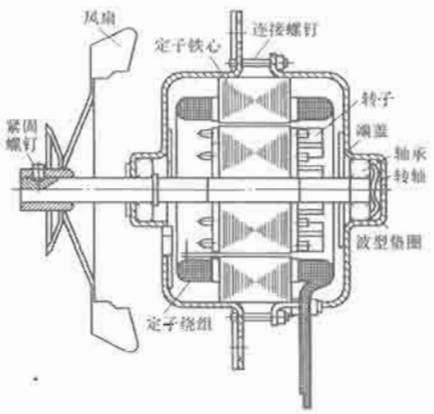


图 3.14-2　XD 型洗衣机电动机结构图

电动机的轴承一般使用滚珠轴承或含油轴承。电动机的使用寿命与轴承的关系较大。滚珠轴承在正常情况下，其寿命可达 8～10 年，在使用期间无须添加润滑油；但电动机的噪声较大，价格相对较贵。含油轴承容易磨损，要求定期添加润滑油，维护不便；但电动机的噪声较低，价格相对便宜。目前，双桶洗衣机电动机一般采用含油轴承，不加油寿命可超过 2000h。

XD 型洗衣机电动机有不同的规格，各种规格的电动机

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

都通用同一种冲片，不同的仅是铁心叠厚，因此，各种规格电动机的径向尺寸都相同，只是轴向尺寸不同而已。该型电动机根据端盖与铁心配合的方式不同，又分为两种型式：①XDS型电动机，其端盖端面与定子铁心端面贴合，由定位销定位；②XDI型电动机，其端盖止口与定子铁心外圆配合，铁心伸入端盖室内。这两种电动机的结构除轴伸端至端盖安装面的距离尺寸及外形尺寸不同外，其余尺寸均相同。

XD型洗衣机电动机的铁心尺寸及绕组数据见表3.14-9。

(2) 全自动波轮式洗衣机用电动机

全自动波轮式洗衣机由一台电动机作为洗涤和脱水的驱动。一般地，电动机安装在弹性支柱上，在洗涤或漂洗时，电动机带动离合器的内轴，使内轴上的波轮做正反向旋转，而脱水桶不动；当进入脱水程序时，通过电气控制使扭簧抱紧离合器的外轴，内外轴一起带动洗涤脱水桶一起旋转，实现脱水功能。

目前，国内所生产的全自动波轮洗衣机大多使用YXQ型电动机，它也是一种单相四极电容运转感应电动机。YXQ型全自动波轮式洗衣机用电动机由XD型洗衣机电动机派生，其结构、外形尺寸、安装尺寸等都与相同规格的XD型电动机一致，仅是电气性能及绕组数据略有差异。

YXQ型全自动波轮式洗衣机用电动机的电气性能见表3.14-10。

(3) 滚筒洗衣机用电动机

滚筒洗衣机多为半自动型或全自动型，其滚筒兼作洗涤桶和脱水桶用，仅由一台电动机驱动。当洗涤和漂洗时，滚筒以50～60r/min的低速正反向旋转；当脱水时，滚筒以500～1200r/min的高速单向旋转。现在比较常用的电动机有串励电动机（HXG系列）和单相感应双速电动机（YXG系列）等，一些高档的滚筒洗衣机也使用直流无刷电动机（DDX系列）、三相变频电动机（YXT系列）等。本节主要介绍单相感应双速电动机的结构与电气性能。

目前，国内滚筒洗衣机单相电容运转双速感应电动机大多仍使用YXG型电动机。对洗衣量为2kg（干衣）的洗衣机，其配用的电动机功率为60/180W，转速为480/2800r/min。由于电动机的两档转速差异较大，且滚筒需反复正反向旋转，因此，要求电动机具有较大的起动转矩，且起动过程中，最小转矩不得小于堵转转矩。如此，在电动机设计上，其定子铁心上分别嵌有极数为2极和16极的两套独立绕组，每套绕组单独工作从而得到两种转速。

YXG型电动机的主要电气性能见表3.14-10。

(4) 脱水机用电动机

在脱水机或双桶洗衣机中，脱水桶由电动机通过联轴器直接带动。电动机立式安装，由端盖安装平面固定在弹簧支柱上，以适应脱水桶及其负载在旋转时因不平衡而出现的抖动。当电动机旋转时，电动机驱动脱水桶以1350～1450r/min的转速旋转。

根据脱水机的规格2.0kg、3.0kg、4.0kg（干衣物重量），选用的电动机功率相应为25W、40W、60W。

常用的脱水电动机为S2短时工作制。实际使用中，脱水时间由发条或电动式机械定时器进行控制，定时时限可以根据需要设定，一般最大定额为5min。

表3.14-9　XD型洗衣机电动机的铁心尺寸与绕组数据（220V、50Hz）

序号	功率(W)	定子铁心				气隙(mm)	主、辅绕组		线圈匝数		轴承
		尺寸(mm)	圆角直径(mm)	长(mm)	槽数		线径(mm)	串联总导体数	A	B	
1	90	107×107	117	34	24	0.25	0.35	2520	115	200	201
2	120			40			0.41	2000	92	158	
3	180			50			0.45	1584	72	126	
4	250			62			0.50	1360	62	108	

表3.14-10　各类洗衣机电动机主要技术数据

洗衣机类型	电动机功率(W)	同步转速(r/min)	干衣服质量(kg)	电容量(μF)	堵转电流(A)	堵转转矩(N·m)	最大转矩(N·m)	效率(%)	温升限值(K)	噪声限值(dB)
波轮式洗衣机	90	1500	1.5～2	6，8，9	2.0	0.596	1.067	49	75	62
	120	1500	1.5～2	6，8，9	2.5	0.753	0.92	52	75	62
	120	1500	2～2.5	8，10	2.5	0.753	0.92	52	75	62
	180	1500	3～3.5	10，12	4.0	1.004	2.13	56	75	62
	250	1500	4～5	16	5.5	1.22	2.97	59	75	62
全自动洗衣机	120	1500	1.5～2	10，12	2.5	0.921	1.52	46	75	60
	(135)	1500	1.5～2	12，14	3.0	1.129	1.68	49	75	60
	180	1500	3～3.5	14，15，16	4.0	1.757	2.3	52	75	60
滚筒式洗衣机	180/60	3000/375	5	14/16	8/2	1.38/0.376	2.13/0.71	40/25	75	65
脱水机	25	1500	2	3	1.15	0.34	0.44	22	85	55（滑动轴承）
	(30)	1500	2	3	1.20	0.35	0.47	25	85	
	40	1500	3	4	1.35	0.41	0.53	30	85	60（滚珠轴承）
	(45)	1500	3	4	1.40	0.43	0.56	33	85	
	60	1500	4	6，8	1.50	0.52	0.68	41	85	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

目前，国内所生产的脱水机大多仍然使用 YYG 型电动机。YYG 型脱水机用电动机为单相电容运转感应电动机，其结构与波轮式洗衣机用电动机相似，唯一的区别是它的后端盖凸边较宽，以便于稳定安装。为了降低电动机的噪声，该电动机多用 201 型低噪声滚珠轴承，也有为降低成本，采用具有自润滑性能的青铜石墨含油轴承，其具有自润滑性能。电动机的引出线以颜色标志，接线时要注意给定的线端颜色。

YYG 型脱水电动机的主要电气性能见表 3.14-10。

2.3　洗衣机及其电动机的交替换向旋转

洗衣机的旋转换向是通过改变电动机绕组接线方式使得电动机交替换向旋转来实现的。电气控制原理见图 3.14-3。图中定时器主触头 S11 控制洗衣机全工作过程的通电时间，副触头 S12 和 S13 分别以不同的规律控制电机正、反转和断能时间。转换开关 S2 作强洗（标准洗）或弱洗选择。当 S2 作强弱洗选择之后，在定时器触头 S11 接通的时间内，副触头 S12（或 S13）选定的时间规律自动地变换触头接通情况。当接通 a 点时，电动机绕组 W_b 与电容器 C 串联接到电源，而绕组 W_a 直接接到电源，其电流相位落后于绕组 W_b 的电流相位，此时认为电动机正转；当接通 e 点，电动机断能停转；当接通 b 点，电动机绕组 W_a 与电容器 C 串联接到电源，而绕组 W_b 直接接到电源，其电流相位落后于绕组 W_a 的电流相位，电动机反转。

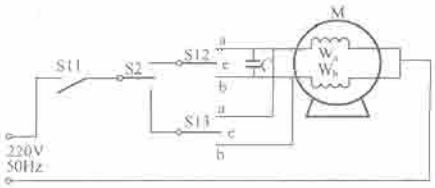


图 3.14-3　洗衣机电动机电气控制原理图

S11、S12、S13—双程序定时器主触头；
S2—强、弱洗转换开关；C—电容器；M—电动机

3　密封式制冷压缩机用电动机

3.1　分类与技术要求

小功率制冷压缩机用电动机主要为内装式单相感应电动机，由于电动机的定子和转子都置于制冷剂和冷冻润滑油的混合物中，因此，电动机的绝缘结构必须具有耐相应制冷剂的化学稳定性。

大多数密封式制冷压缩机电动机是利用定子铁心端面或外圆定位，将定子固定在压缩泵的骨架上，其安装特征及应用范围见表 3.14-11。

目前，家用制冷压缩机用电动机大多采用单相感应电动机，包括有电阻起动、电容起动、电容运转和双值电容等四种型式。电阻分相起动型结构简单，运行可靠，堵转转矩只为额定转矩的 1.3～2.2 倍，起动电流较大，主要用于冰箱压缩机；电容起动方式的压缩机用电动机堵转转矩较大，主要用于家用冰箱、商品陈列柜等制冷器具的压缩机；电容运转方式的压缩机用电动机堵转转矩较小，但效率较高，多用于小型空调器压缩机；双值电容式压缩机用电动机由于运转性能良好，效率和功率因数都较高，起动转矩又较大，多用于功率较大的空调器和其他制冷器具用压缩机。不同用途的小功率制冷压缩机用单相感应电动机类型的选择，可根据压缩机对电动机性能的要求进行，具体可见表 3.14-12。

家用制冷压缩机对电动机的起动转矩一般都要求不高，同时为了缩小体积、减轻重量，一般都采用 2 极电动机。此外，由于密封式压缩机用电动机特定的安装结构型式和运转环境，其还需具备以下一些技术要求：

1）绝缘要求。在密封式制冷压缩机中，电动机直接暴露在制冷剂（如氟里昂）气体和冷冻润滑油的混合物中，直接受到它们所分解的水、氢以及氢氟化合物的腐蚀，电动机的绕组绝缘结构和铁心必须能在这样的腐蚀性环境中长期正常地工作。

表 3.14-11　　密封式制冷压缩机电动机安装特征及应用

密封式制冷压缩机		安装特征	应用范围
类型	结构型式		
往复式	曲柄连杆活塞式	立式，电动机在泵之上；机体固定电动机铁心外圆；整机由弹簧支承在密封外壳内	主要用于家用冰箱、冷冻箱、房间空调器、商业冷冻冷藏设备
	曲柄滑管活塞式	立式，电动机在泵之下；定子铁心用螺栓固定在泵体上；整机用弹簧悬挂在密封外壳内	
旋转式	滑片式	立式，电动机在泵之上；机体固定电动机铁心外圆	主要用于汽车空调器、家用冰箱、冷冻箱、房间空调器
涡旋式	涡旋盘	立式，电动机在泵之下；机体固定电动机铁心外圆	主要用于家用冰箱、冷冻箱、房间空调器、商业冷冻冷藏设备

表 3.14-12　　小功率压缩机用单相感应电动机类型

电动机类型		电阻起动	电容起动	电容运转	双值电容	
起动继电器类型		电流型	电流型	—	电流型	电压型
功率范围（W）		40～120	40～300	500～1500	180～400	350～1500
额定工况下电动机性能	堵转转矩倍数	1.3～2.2	2～3	0.25～0.6	1.5～2.5	1.5～2.5
	堵转电流倍数	5.5～8	6～8	5～7	5～6	5～6
	最大转矩倍数	2～3.5	2～3.5	2～3	2～3	2～3
适用范围		家用电冰箱、储存箱等	家用电冰箱、商品陈列柜、冰水器等	空调器等	冰水器、制冰器、商品陈列柜等	空调器等

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

制冷剂采用氟里昂即氯氟烃（CFC），如R12、R22、R502等的制冷压缩机用电动机常称为耐氟电动机。耐氟电动机所用绝缘材料必须经耐氟性能试验，其绝缘结构及耐腐工艺都要经过整机的功能性试验，以证实电动机在实际工作条件下具有足够的寿命。该试验采用氟里昂-高压釜-正反转（可频繁起动）法进行。对绝缘结构进行耐氟性能定型试验时，其寿命应不低于40×10^3次；在正常生产过程中，进行绝缘结构耐氟性能型式试验时，其寿命应不低于18×10^3次。

电动机的冲片除了进行氧化膜绝缘处理外，在铁心叠片、焊接、车削后，还需经整体500℃蒸汽氧化发蓝处理，使表面形成氧化膜。耐氟电动机所用绝缘结构见表3.14-13。

表3.14-13 耐氟用电动机绝缘结构

用途		材料
电磁线	E级	QF型高强度耐冷媒漆包线 QZ-2型高强度聚酯漆包线
	F级	QXY型高强度聚酰亚胺漆包线 QZY型高强度聚酯亚胺漆包线
槽绝缘		聚酯薄膜、聚酰亚胺薄膜、DMD、NHN、NMN等
槽楔		聚酯薄膜软槽楔、环氧酚醛玻璃布板
带及套管		涤纶或聚酯纤维编织带、涤纶编织套管
浸渍漆		B829、6440耐氟绝缘漆

2）机械装配。由于电动机直接安装在压缩泵体内，电动机转子和压缩泵共轴，因此，制造标准必须保证定子、转子和压缩机的准确对中。固定定子时要保证铁心平面对压缩机轴线的垂直度，安装转子保证定转子间的气隙不均匀度不超过表3.14-14的规定。

表3.14-14 气隙不均匀度

δ（mm）	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
ε/δ（%）	20	18.5	17.5	17	16.5

3）安全性能。从保护人们生命财产安全的角度考虑，压缩机用电动机的安全性能对压缩机的正常使用最为重要，同时也是最基本的要求。我国目前还没有专门针对压缩机用电动机的认证要求，对压缩机用电动机的安全考核包含在压缩机的安全考核中。

在我国，压缩机安全认证所依据的检测标准是GB 4706.17《家用和类似用途电器的安全 电动机—压缩机的特殊要求》。安全标准对电动机的发热、非正常工作、接地、电气间隙和爬电距离等都做出了明确的要求。

特别值得一提的是，在封闭式压缩机系统中，电动机必须具有良好的不漏电连接。在压缩机上，当接线端子将电路从机壳外引入壳内时，它必须与外壳绝缘保证不漏电。许多电动机都通过将接线端子固定在玻璃上，再将玻璃固定在金属盘上，金属盘焊在机壳上。这些接线端子必须能够经受上千次加热和冷却、膨胀和收缩的试验而不泄漏，并且要有高绝缘值。

3.2 结构与技术数据

密封式制冷压缩机用电动机都是内置式，由无轴转子和无机座端盖的定子组成，如图3.14-4所示。压缩机与电动机共轴，置于压缩机泵体内，大多数压缩机电动机利用定子铁心端面或外圆定位，将定子固定在压缩机的骨架或外壳之上。其中，图3.14-4（a）是由外圆定位安装的铁心结构，外圆安装的铁心结构与一般电动机定子铁心结构无异；图3.14-4（b）是以端面定位安装铁心结构，在这种结构中，定子铁心上有安装套孔，其外形多为方圆形，安装平面与定子铁心内圆轴线垂直。定子铁心多采用氩弧焊接来固定冲片，以提高在振动条件下工作的牢固性。为了加强定子冲片片间绝缘和铁心的防锈与耐腐蚀的能力，冲片要作氧化膜绝缘处理，铁心经叠压、焊接、车削加工后，还要作整体蒸汽氧化（发蓝）处理。

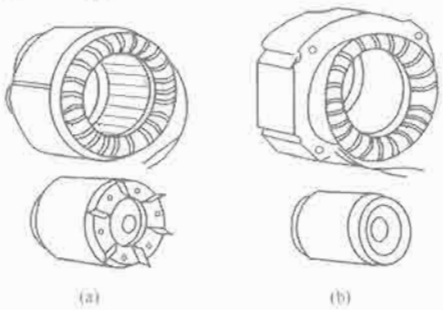


图3.14-4 密封式制冷压缩机用电动机结构图
（a）外圆定位式；（b）端面定位式

铸铝笼型转子轭部开有多个轴向通气孔，以加速蒸发气体的循环。为适应压缩机结构的需要，在转子的非轴伸端，端环的轴向尺寸较大，并装有风扇叶片，以便于在压缩机久停后重新起动时分离充满腔内的油气泡沫，加速制冷剂循环。在轴伸端的端环上，装有平衡曲轴和活塞的配重块。在靠近轴承端的转子轴孔处，扩大一圆孔使轴瓦伸进转子，以减少压缩机的轴向长度。

JIB系列电冰箱压缩机用电动机（单相电容运转式电动机）的技术数据见表3.14-15。YYR系列空调压缩机用电动机（单相电容运转式电动机）的技术数据见表3.14-16。

表3.14-15 JIB系列电冰箱压缩机用电动机技术数据（220V，50Hz）

型号	输出功率（W）	效率（%）	起动转矩（N·m）	功率因数	起动电流（A）	绝缘等级
JIB60-2	60	60.4	≥0.4	0.49	9.0	B
JIB60-2A	60	68.1	≥0.38	0.65	8.5	B
JIB80-2	80	62.3	≥0.48	0.57	10.8	B
JIB80-2A	80	71.3	≥0.51	0.64	9.5	B
JIB78-2	78	75	≥0.45	0.89	8.5	E
JIB90Z222	93	61	≥0.45	0.62	11.6	E
JIB100-2	100	67	≥0.21	0.88	5.0	E
JIB100-2A	100	67	≥0.5	0.65	10.0	E
JIB120-2	120	70	≥0.24	0.88	5.0	B

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3.14-16　　YYR 系列空调压缩机用电动机技术数据（220V、50Hz）

型　号	额定功率（W）	额定转速（r/min）	堵转转矩（N·m）	效率（%）	功率因数	电容器（μF）
YYR0.75-2-R2	750	2880	≥0.75	83	0.97	25
YYR1.1-2-R2	1100	2874	≥1.1	85	0.95	30

3.3　电动机的控制与保护

家用制冷压缩机的控制与保护功能主要由起动元件、温控器及电动机过热或过电流保护器组成。

温度控制主要是使制冷器具所控制的环境温度保持在某一额定的范围，主要通过对压缩机的起停或转速控制来实现，控制元件多为压力式温控器或电子式温控器。

电动机的过载热保护一般使用双金属片式热保护器。电动机的过电流和过热双重保护功能通过以下方式实现：将保护器导电部分与电动机绕组公共端串联，使电动机电流通过保护器，当电动机过载时，电流长时间超过额定电流，使保护器内的电阻发热，碟形双金属片向上翘起，使导电接点断开，切断压缩机电动机电路。同时，安装保护器使其上端面紧贴在压缩机的外壳平整处，压缩机表面热量会传递到保护器，当机壳温度高于正常值时，碟形双金属片亦会翘起，断开导电接点，从而切断电路。这种热保护器会随电流减小或机壳温度降低而自动复位，可以多次使用实现过电流和过热双重保护。有些压缩机使用埋入式热保护器，它属于一种微型双金属热继电器，保护器绑扎在电动机绕组的端部，电路上与电动机绕组串联，同样实现过电流和过热双重保护。

使用电阻分相起动或电容起动的电动机均需安装起动器。流行使用的起动器是重锤式起动器和 PTC 元件起动器。

4　泵用电动机

4.1　分类与技术要求

泵用电动机包括三相电泵、单相电泵、微型潜水电泵和清水泵用电动机。

其中，机床冷却用电泵是机床冷却泵电动机与单级离心泵的组合，供泵送机床冷却液或润滑油之用，亦称油泵。大多数的机床冷却泵都配专用三相笼型感应电动机，故称为三相电泵；也有配单相感应电动机的，称为单相电泵。

微型潜水电泵是单相潜水电动机和水泵的组合，适宜于潜入水中工作，不受水泵吸程的限制，适用于农村、城镇作吸排灌溉及提取生活用水，也可作为市政工程吸排水之用。

清水泵是由离心式清水泵体和小功率感应电动机组成的机泵共轴的微型水泵。它具有效率高、重量轻、结构简单、通用性强等优点，适宜于小块农田灌溉、家庭生活用水、高层建筑供水等场合使用，便于携带、安装、维修和使用。

以上电泵为了得到较高的叶轮转速，均使用两极的小功率感应电动机，由于使用场合供电电源的特点，农用和家用泵大多选配专用单相电动机。

根据电泵特定的用途和使用环境，电泵用电动机主要有以下一些特定的技术要求。

1）密封性。由于电泵传输水或油等液体，若电泵的密封性不好，导致水或油接触到带电部分，极易造成电动机本身的绝缘损伤和操作人员的触电，因此，电泵的密封性设计对泵的安全使用是非常重要的。

电泵的密封性主要考虑两个方面的问题：一是电动机本身的防水等级；二是轴封的可靠性。由于电泵均采用机泵共轴结构，这个特点极易导致被传输的液体（如水或油）从泵体进入电动机内部，即俗称窜水窜油现象。

对家用及类似用途的泵，根据标准 GB4706.66《家用和类似用途电器的安全　泵的特殊要求》的规定，潜水泵防水等级必须是 IPX8；供游泳池清洁及其他维护用的便携式泵至少应是 IPX7；其他泵至少应是 IPX4。由此可见，在无额外防护措施的情况下，用于以上几类泵的电动机也必须达到相应的防水等级。对机床冷却用电泵电动机，根据相应产品标准的规定，其防护等级不能低于 IP44。

泵的轴封一般采用机械密封或橡胶骨架油封，两者通用，但采用橡胶骨架油封时，需加装护轴套。对家用及类似用途的泵，根据安全标准 GB 4706.66 的规定，要通过非正常试验来考核轴密封的可靠性。

泵用电动机的选用及密封方式见表 3.14-17。

表 3.14-17　　泵用电动机的选用及密封方式

泵的类别	扬程（m）	流量（L/min）	电动机类型	电动机功率（W）	应　用	密 封 方 式
单相电泵	3～4	10～25	单相电容运转感应电动机	25～60	使用在由单相交流电供电的小型机床上，输送冷却液或润滑油	用挡水圈防止油、水窜漏
单相潜水电泵	5～20	50～250	单相电阻起动或电容运转感应电动机	180～550	潜入水中工作，适用于农田、果园的吸排、喷灌及提取生活用水，也可作为市政工程吸排水之用	由双机械密封及骨架密封组成，在密封室内充有变压器油或蒸馏水，对电动机的机壳、端盖及泵体均需作水压试验，机壳与端盖连接处加 O 形橡胶密封圈
清水泵	4～20	40～240	单相电阻起动感应电动机	180～1100	适用于小块农田灌溉，家庭生活用水，城市高层建筑供水	用机械密封或橡胶骨架加保护轴套油封

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2) 安全性能。从保护人们生命财产安全的角度考虑，电泵用电动机的安全性能对电泵的正常使用最为重要，同时也是最基本的要求。在国家目前推行的关于小功率电动机的强制性产品认证中，包含针对电泵用电动机的认证要求。

在我国，安全认证所依据的检测标准是 GB 12350《小功率电动机的安全要求》。在该标准中，同时要引用到 GB/T 5171《小功率电动机通用技术条件》、电泵用电动机的相关产品标准 JB/T 4376《水泵用小功率感应电动机技术条件》以及水泵安全标准 GB 4706.66《家用和类似用途电器的安全　泵的特殊要求》的相关规定等。

4.2 结构与技术数据

(1) 机床冷却用电泵

机床冷却用电泵又分为三相电泵和单相电泵。

单相电泵是低扬程、小流量的离心泵，使用时泵体部分将浸入液体中，电动机驱动离心泵旋转时，液体被吸入泵体内，经导水管由出水嘴喷出一定压力和流量的液体。电泵一般用于供给机床循环冷却液，冷却被加工的工件或加工工件用的刀具。

单相电泵为立式安装，电动机采用封闭式结构；泵体、蜗壳及叶轮等主要零部件用铸铁、铝合金或工程塑料等制造。由于电泵在工作时容易出现窜水窜油现象，一般采用加挡水圈等措施，以防止水或油对绕组绝缘的破坏，延长电泵的使用期限。

机床冷却用单相电泵仅配用单相电容运转感应电动机。单相电泵及其配用单相电容运转感应电动机的主要技术数据见表 3.14-18。

(2) 单相潜水电泵

根据起动转矩大小的需要，单相潜水电泵通常采用两种电动机型式：QXB 型和 QXD 型。QXB 型配用单相电阻起动感应电动机，起动转矩大，适用于电网电压较低且又需要电动机经常起动的场合；QXD 型配用单相电容运转感应电动机，其特点是力能指标较高，适用于长时间连续工作而无须经常起动的场合。

潜水电泵所用的潜水电动机一般使用干式结构，水泵与电动机之间的密封装置由双机械密封和一只骨架密封组成，在密封室内充有变压器油或蒸馏水。电动机的机壳、前后端盖及泵体均要经受水压试验，在机壳与端盖连接处还加有橡胶 O 形密封圈，有效地防止水渗入电动机内部，加上电动机零部件都做了耐潮、防锈处理，保证了潜水电泵运行的可靠性。

单相电动机起动用离心开关、电容器、热保护器都安装在密封的机壳内。离心开关与电容器串联接在副绕组电路，起动后转速升高至规定值后，即切断副绕组电路。通过主副绕组的公共点串联热保护器后，接至电源的另一端，热保护器常用碟形双金属热保护器，起到过电流和过热双重保护作用：当电动机绕组温度升高至保护器动作温度后，触头分断，电路即被切断，而温度降低后保护器又自动复位，接通电路；当电流超过额定电流的 1.2 倍且持续约 20min 后，热保护器也会动作，当电流小于或等于额定电流时则不动作。

常见单相潜水电泵及其配用单相感应电动机的主要技术数据见表 3.14-18。

表 3.14-18　　泵及配用单相感应电动机的主要技术数据

泵的类别	扬程 (m)	流量 (L/min)	电动机类型	电压 (V)	功率 (W)	转速 (r/min)
单相电泵	3	10	单相电容运转电动机	220	25	2800
	3	12		220	25	2800
	4	25		220	60	2800
单相潜水电泵	8	50	单相电阻起动电动机	220	180	2800
	5	100	单相电容运转电动机	220	180	2800
	5	167		220	250	2800
	5	250		220	370	2800
	7	100		220	250	2800
	7	167		220	370	2800
	7	250		220	550	2800
	11	50		220	250	2800
	10	60		220	370	2800
	10	167		220	550	2800
	15	50		220	370	2800
	14	100		220	550	2800
	20	50		220	550	2800
清水泵	6.3～5.3	48～98	单相电阻起动电动机	220	180	2800
	4.65～3.2	100～208		220	250	2800
	6.7～4.9	64～134		220	250	2800
	10.2～8.8	42～100		220	250	2800
	8.5～7.3	100～167		220	370	2800
	11.4～8.8	50～125		220	370	2800

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

（3）单相清水电泵

微型清水电泵由单级离心式清水泵与专用小功率感应电动机共轴组成，主要包括泵体、叶轮、密封件、连接座、电动机等部件，使用时还需配上截止阀和进、出水管。水泵与电动机共轴，水泵叶轮直接装在电动机轴上，泵壳则通过连接座与电动机端盖相连。电动机出线根据用户需求，分别用出线盒或用电缆直接引出。

微型清水泵电动机型式的选择主要依据克服机组静摩擦阻力矩所需要的电动机起动转矩。这种静摩擦转矩主要由水泵密封件产生的静摩擦阻力决定。不同厂家生产选用的密封件不同，有橡胶骨架油封、机械密封和填料函等，同时受加工与装配质量的影响，使得不同密封结构的水泵，其静摩擦转矩相差很大。对静摩擦转矩较小的水泵，可配用起动转矩适中的电阻起动单相感应电动机，或起动转矩较小的电容运转单相感应电动机；当静摩擦转矩较大时，可配用起动转矩较大的电容起动单相感应电动机。

实际使用中，一定要使选用水泵实用的扬程接近水泵的标定扬程，若水泵实际使用扬程降低时，电动机的功率反而增大，使水泵流量增大，有可能使电动机过载。在使用中还要注意尽可能使供电电压与电动机的额定电压相一致，若电动机的端电压降低，则电动机的电流增大，输入功率增加，效率相应下降，会引起电动机温升升高；长期的低压运行将使电动机的绝缘性能恶化，甚至因过热而烧毁。

常见单相清水电泵及其配用单相感应电动机的主要技术数据见表 3.14-18。

5　离合器电动机

5.1　分类与应用

离合器电动机是由飞轮、离合制动器与电动机组成一体的特殊用途感应电动机，分为三相和单相两类。离合器电动机多用作驱动工业缝纫机用，故又称为工业缝纫机电动机。电动机安装在工业缝纫机工作面板之下，由脚踏拉动控制拉杆从而操作离合器来带动传动带轮，由传动带轮传动缝纫机工作。

除此之外，也可以利用离合器电动机优异的离合制动特性，作小型机床、磨床、包装机、传动带机等需要频繁起动、停止的小型机械驱动用。

5.2　结构与技术数据

电动机一般采用 S1 连续工作制，封闭式结构，机座安装在可调整中心高的带防振块的法兰底座上。离合器轴的一端作为电动机的轴伸，以安装传动带轮，另一端与摩擦盘连接，盘的一面固定软木摩擦块。当拉下拉杆时，推动滑套而使摩擦盘移向飞轮一方紧贴飞轮，此时电动机带动传动带轮旋转；放松拉杆时，弹簧将拉杆复位，摩擦盘移向另一方，与飞轮松开贴合，直至与固定在端盖上贴有软木的制动块紧贴，从而借助摩擦力使输出轴制动。适当操作拉杆，可以实现微动、缓冲起动，也可在小范围内变速。电动机轴上装有大惯量的飞轮，当运转中出现较大的瞬时过转矩时，系统的转速仍能保持稳定，此类电动机应空载起动，不宜迅速反转。离合器电动机的结构如图 3.14-5 所示。

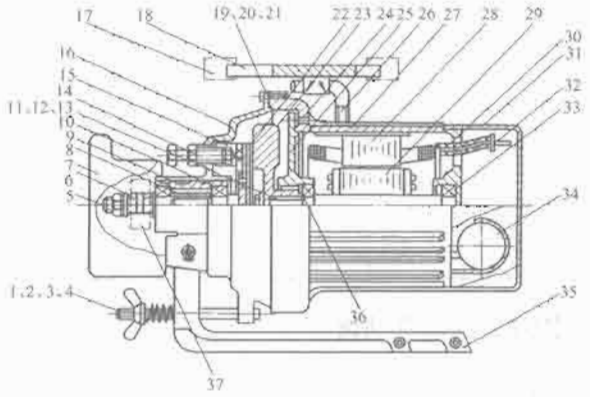


图 3.14-5　离合器电动机结构图

1—弹簧压盖；2—碟形螺母；3—弹簧拉栓；4—弹簧；5—离合器轴组焊件；6、13—键；7—带轮外罩；8—隔套；9—滑套；10、33—轴承；11—螺母；12—垫圈；14—调节螺栓；15—制动块组合；16—离合器端盖；17—减振块组合；18—底脚；19、24—螺钉；20—垫圈；21—离合器盖压板；22—摩擦盘组合；23—飞轮；25—前端盖；26—中心高调节杆；27—机座；28—定子铁心；29—转子；30—插头引线；31—电容器罩；32—插头支架；34—电容器；35—拉杆；36—波形垫圈；37—带轮

离合器电动机上一般附有 12V 的电源引出端子，作为缝纫机的低压照明电源，可供 15～20W 的照明灯泡用。这就是在绕组的一相线圈上直接抽头（自耦变压器式）、或是将一独立的线圈嵌在一相绕组的同槽中，用绝缘纸隔相分开。

离合器电动机与一般电动机相比，具有以下特点：

1）由于设计电动机时选用了较低的气隙磁通密度（小于 0.5T）及较小的电流密度（低于 5.5A/mm²），加上优良的制造工艺，使得电动机的温升较低，并保证了电动机噪声在离合器分或合时相差不大于 1～2dB（A）。

2）在电动机连续运转中，借助于离合器的动作来实现工作机械的快速起动和停转，控制装置简便，操作灵活，能量损耗小，适宜于较高的操作频率。

3）适当操作拉杆，可以实现微动、缓冲起动，还可在小范围内变速。但电动机只适宜于空载起动，且不适宜于反复地正反转运行。

4）应用了飞轮效应，运转中出现较大的转矩波动时，转速仍可保持稳定，较小功率的电动机适用于有较大瞬时过转矩的负载。

5）在离合制动器被操作时，输出轴有约 2.5mm 的轴向窜动，选择传动方式时要考虑这个特点。

6）由于摩擦块的磨损，要定期调整摩擦副的间隙，甚至更换摩擦块。

常见单相离合器电动机的铁心尺寸见表 3.14-19，绕组数据见表 3.14-20。常见单相离合器电动机的电气性能参数可参照标准 JB/T 3698 的规定。

表 3.14-19　单相离合器电动机铁心尺寸（220V，50Hz）

序　号	电动机型号	极　数	定子铁心					转子铁心	
			外径（mm）	内径（mm）	长（mm）	气隙（mm）	槽数	外径（mm）	槽数
1	DOL09-12	2	120	60	45	0.3	24	59.4	18
2	DOL12	2	138	75	52	0.5	24	74	34
3	DOL22	2	138	75	56	0.5	24	74	34
4	DOL32	2	138	75	70	0.5	24	74	34
5	DOL14	4	138	84	56	0.4	24	83.2	30
6	DOL24	4	138	84	68	0.35	24	83.3	30

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3.14-20 单相离合器电动机绕组数据（220V，50Hz）

序号	电动机型号	主绕组		副绕组		电容量（μF）	照明绕组匝数
		线规（mm）	每极匝数	线规（mm）	每极匝数		
1	DOL09-12	2-φ0.53	211	φ0.64	285	16	—
2	DOL12	2-φ0.71	153	φ0.64	168	32	23
3	DOL22	2-φ0.77	133	φ0.75	209	16	—
4	DOL32	2-φ0.71	94	2-φ0.71	126	32	19
5	DOL14	1-φ0.75	200	φ0.64	230	12	—
6	DOL24	2-φ0.77	79	2-φ0.71	93	48	—

6 空调器风扇电动机

6.1 分类与技术要求

空调器风扇电动机用于驱动房间空调器风扇扇叶。该风扇在空调系统中用于将蒸发器产生的冷空气吹送到室内，或同时将冷凝器产生的热量排送到室外。这类电动机广泛应用于各种窗式空调器、分体式空调器、立柜式空调器以及风机盘管式空调器中，也可用于热泵、除湿机的风扇驱动。

目前，大多数空调器风扇电动机采用单相电容运转感应电动机，部分变频空调器采用铁壳直流无刷电动机或塑封直流无刷电动机。

按照空调器的型式和结构，电动机分为单轴伸电动机和双轴伸电动机。单轴伸电动机只驱动一个扇叶来完成送风或排热的单一功能，主要用于空调器的室内机或室外机；双轴伸电动机可在电动机两端同时各驱动一个扇叶来同时完成送风和排热两种功能，一般用于窗式空调器。

按照电动机的外壳材料，电动机分为钢板外壳电动机和塑封外壳电动机两种。

按照电动机安装型式的不同有以下一些常见型式：不带减振器和摇篮式减振底脚；带减振器而不带摇篮式减振底脚；不带减振器而带摇篮式减振底脚；刚性底脚安装；凸耳支架安装等。

由于空调器特定的应用条件，这种电动机的专用性很强。它有以下一些特定的技术要求。

1）使用环境。根据空调器不同的使用环境，这类电动机的最高环境空气温度，按照气候类别分为 T1 类（43℃）、T2 类（35℃）、T3 类（52℃）三种，电动机的设计要分别对应其中一类。

2）噪声和振动。噪声是室内空调器的重要指标，而空调器主要噪声源之一是风机系统，因此，要求空调器风扇电动机的噪声比一般用途电动机的噪声要小得多。为了适应不同类型空调器配套的需要，对电动机在空载运转时测得的 A 计权声功率级噪声限值，分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类，具体值可参照标准 JB/T4270 的规定。举例来说，对于分体式空调，室内机用风扇电动机可用Ⅰ类（低噪声级）或Ⅱ类（优等级），而室外机用电动机可选用Ⅱ类或Ⅲ类（普通级）。

对空调器风扇用电动机的振动要求为，在空载运行时测得的振动速度不超过 1.8mm/s。

3）安全性能。从保护人们生命财产安全的角度考虑，空调器风扇电动机的安全性能对空调器的正常使用最为重要，同时也是最基本的要求。在国家目前推行的关于小功率电动机的强制性产品认证中，包含针对空调器风扇电动机的认证要求。

在我国，安全认证所依据的检测标准是 GB 12350《小功率电动机的安全要求》。在该标准中，同时要引用到 GB/T 5171《小功率电动机通用技术条件》、房间空调器风扇电动机的产品标准 JB/T 4270《房间空调器风扇电动机通用技术条件》以及空调器安全标准 GB 4706.32《家用和类似用途电器的安全　热泵、空调器和除湿机的特殊要求》的相关规定等。

6.2 结构与技术数据

（1）空调器风扇用钢板外壳电动机

目前，大多数的空调器风扇用电动机仍然采用钢板外壳、封闭式结构。其基本特点是：机壳用优质钢板卷制而成，具有较高的机械强度；端盖为铝合金压铸成型或用钢板拉伸成型；安装方式有底脚安装、减振底脚安装和减振弹性圈安装等三种。常用的减振装置是在电动机两端端盖凸台套上橡胶减振圈，然后由安装支架支撑，或用摇篮式底脚支撑。

为适应排、送风的不同使用情况，电动机有单轴伸和双轴伸两种。电动机的轴伸长度比一般电动机要长，多在 45～180mm之间；轴伸直径在 8～14mm 之间。电动机对其轴伸的平直度有严格的要求，在轴伸长度为 50mm 及以下时，轴伸接合部分中点的圆周面上，其圆跳动不能超过 0.03mm；当轴伸长度为 50～70mm 时，其圆跳动不能超过 0.045mm；然后每增长 25mm，其径向圆跳动允许比上一档增大 0.015mm。

电动机大多采用高精度低噪声的密封滚珠轴承，也有采用粉末冶金铜基含油轴承的。当使用含油轴承时，在轴承系统中设有油毡和护油环，使得轴承润滑良好，以提高使用寿命。为满足噪声要求，电动机一般按低噪声设计，高精度加工并对转动部分校动平衡，以有效地降低电动机的噪声和振动。

为了满足电动机调速的要求，多采用副绕组抽头调压调速，根据需要做成二档或三档转速。部分规格空调器风扇用钢板外壳电动机的主要技术数据见表 3.14-21。

（2）空调器风扇用塑封电动机

空调器风扇用塑封电动机是一种塑料整体封装式电动机，这种电动机取消了传统结构电动机的钢制或铝制外壳及其绝缘处理，而采用独特的塑封技术，将电动机的定子铁心、绕组、绕组连接线等用塑料整体封装组成。塑封电动机的优点是：简化电动机零件和工艺，结构简单，轴向尺寸短，易于实现机械化大生产；噪声极低；外壳温升低；绝缘可靠，耐潮湿，阻燃性好，安全性高；体积小，用料省。该种电动机主要的缺点是：不易返修，即使在生产线末端发现电动机有质量问题，亦不易敲开热固性塑料外壳进行返修；电动机废弃后，热固性塑料不易分解，易造成环境污染。

塑封电动机的主要结构特点是：定子铁心多采用两个半

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

圆形，绕组为环形绕组，用高速绕线机绕线后的两个半圆形铁心拼合焊接成圆形定子。圆形定子直接用塑料密封，装在轴上的端盖（铝合金薄板冲压而成）与塑料外壳黏接成不可拆装的整体。也有采用整圆冲片或齿形冲片的，外绕线后套入叠片磁轭。定子槽绝缘为厚度仅为 0.5mm 的多槽衬套，由轴向分为两瓣的两个衬套合成整个铁心绝缘，线圈在包有衬套的铁心上绕制。对于多速电动机，其调速绕组是分别绕制的，以便于抽头和绝缘。电动机的转子结构与通常的笼型转子相同，不过多使用工艺性较好的光轴。作为轴承座的小端盖，由 0.8～1mm 的镀锌钢板冲制、拉伸而成，其弯曲的形状如弹性垫，有利于减小电动机的振动和噪声。

塑封料一般使用由玻璃丝增强的热固性塑料。这种塑料多以不饱和聚酯树脂 BMC 为主体，掺有稳定剂、润滑剂、脱模剂、固化剂、固化促进剂、阻燃剂、抗静电剂、抗老化剂等多种成分的改进剂，加上填料以及染色剂经配比混合后的塑料团，在一定的温度和压力下模压成型，具有较好的机械强度、优良的介电性能、耐腐蚀性能、成型温度不高、工件表面光洁美观等优点。

YYK 系列空调器风扇用塑封电动机的主要技术数据见表 3.14-22。

表 3.14-21　　空调器风扇用钢板外壳电动机主要技术数据（220V，50Hz）

型　号	输出功率 (W)	转速（r/min）		堵转转矩 (N·m)	效率 (%)	振动 (mm/s)	噪声限值 (dB)（A）	电容量 (μF/V)
		高　速	低　速					
YYK2-30-6Z	30	950	880	0.18	38	0.7	45	2.5/450
YYK-60-4D	60	1350	1150	0.24	52	1.2	50	2.5/450
YYK-80-4	80	1330	1230	0.27	52	1.2	50	4/400
YYK-100-4D	100	1050	850	0.31	62	1.2	50	6/400
YYK-100-6D	100	950	800	0.46	50	0.7	48	4.8/450
YYK-100-6GD	100	950	800	0.46	50	0.7	48	4.8/450
YYK-120-4	120	1350	1230	0.55	62	1.2	52	6/400
YYKF-120-4	120	1200	1000	0.36	55	1.2	52	6/450

表 3.14-22　　YYK 系列空调器风扇用塑封电动机主要技术数据（220V，50Hz）

型　号	功率 (W)	额定电流 (A)	额定转速（r/min）			功率因数	效率 (%)	堵转转矩 (N·m)	最大转矩 (N·m)	噪声限值 (dB)（A）	电容量 (μF)
			高速	中速	低速						
YYK7-4D	7	0.105	1350	1250	1150	0.96	37	0.054	0.078	35	0.6
YYK7-4DN	7	0.13	1300	1200	1100	0.90	30.4	0.0331	0.0662	35	0.6
YYK10-4I	8.1	0.109	1300	1150	1100	0.98	33.5	0.0595	0.0738	35	1
YYK12-4D	12	0.152	1320	1250	1150	0.97	38.9	0.0771	0.12	35	1
YYK13-4D	13	0.168	1300	1150	1100	0.98	37.4	0.0717	0.137	35	1.2
YYK10-4G	10	0.18	1220	1100	960	0.98	37	0.05	0.08	35	1.2
YYK12-4	12	0.14	1320	1200	1080	0.97	34	0.05	0.09	36	1
YYK10-4Q	10	0.18	1280	1140	1000	0.98	37	0.05	0.08	35	1.2

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第15章 感应发电机

1 感应发电机工作原理

感应发电机基本原理的物理状态在本篇第2章已有描述，有两种运行方式：一种是与电网并联运行；另一种是独立运行。当与电网并联运行时，原动机拖动电机转子加速到超过气隙磁场的同步转速，使转差率变为负值，感应电机运行在发电机状态，有如下功率关系

$$P_{mec} = P_1 - P_{fv} - P_s$$

式中，P_1 为原动机输入的机械功率；P_{mec} 为总机械功率；P_{fv} 为通风及机械摩擦损耗；P_s 为附加损耗。

电磁功率为

$$P_{em} = P_{mec} - P_{Cu2}$$

式中，P_{Cu2} 为转子铜损耗。

由定子输出的电功率为

$$P_2 = P_{em} - P_{Cu1} - P_{Fe}$$

式中，P_{Cu1} 为定子铜损耗；P_{Fe} 为铁损耗。

感应发电机的功率流程如图3.15-1所示。

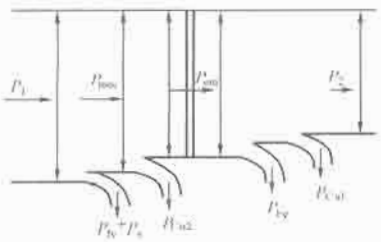


图3.15-1 感应发电机的功率流程

由于运行在电网上的感应发电机必须从电网吸取无功电流来励磁，使电网的功率因数降低。当并联在电网上的感应发电机较多时，则需要进行无功补偿。因此感应发电机通常只用于小容量电站，如风力发电和小水力发电。

当感应发电机独立运行时，必须在定子绕组的出线端并联电容器，利用容性超前电流供给发电机所需的励磁电流以建立电压，这种电机称为自励感应发电机，如图3.15-2所示。

带电容器感应发电机的自励过程与并励直流发电机相似。图3.15-3给出了在 f=常数时的自励过程，首先发电机转子必须有剩磁（如果无剩磁可用蓄电池或直流电源短时起励），原动机拖动转子，定子绕组内的剩磁将感应电动势，此电动势加在电容器上，绕组内流过超前的容性电流加强剩磁，使电动势进一步增大，从而容性电流增加，增大的容性电流又增强磁场，此自励过程沿着电机的空载特性 $U_1=f(I_0)$ 和电容器的伏安特性 $U_c=f(I_c)$ 两者之间的区间进行，一直达到两特性的交点A为止。因此，在转速和电容量一定时，电容器的伏安特性必须与电机的空载特性存在交点，发电机才能建立稳定的空载电压，伏安特性的斜率由下式决定

$$\tan\alpha = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

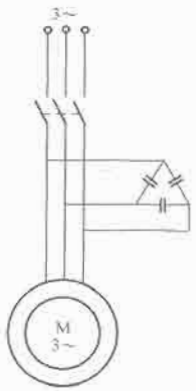


图3.15-2 自励感应发电机

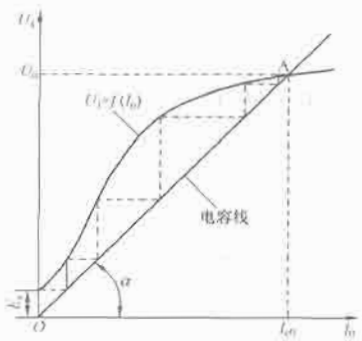


图3.15-3 感应发电机自励过程

改变电容量 C 的大小可以调节 α，从而改变A点的位置，亦即改变发电机的端电压。当电容量减小到某一数值时，电容器的伏安特性与空载特性不饱和的直线部分相切，发电机不能建立起电压，与此相应的电容值称为临界电容量。改变电机的转速也可以改变A点的位置，但发电机通常在额定转速运行。

感应发电机的定子绕组和电容器构成一振荡回路，发电机的电压频率决定于该回路的自振频率，改变电容值可以改变电压的频率。当保持转速不变时，发电机的端电压和频率将随负载的增加而下降。要维持频率不变，必须相应地提高电机的转速；要维持电压不变，除了适当提高转速外，主要采用增加电容量的办法来实现。

2 感应发电机等效电路与相量图

与电网并联运行的感应发电机的等效电路与感应电动机的相同（参见本篇第2章第2节），只是转差率 s 为负值，功率流程由转子侧流向定子侧。发电机定子和转子合并的相量图与电动机的相量图有根本区别。在电动机情况下，因为转子转速小于同步转速，$n<n_s$，旋转磁场以同一方向切割定子和转子导体，因此，在合并的相量图中，电动势 $\dot{E}_{2s}$ 与 $\dot{E}_1$ 同相。在发电机中则相反，因为 $n>n_s$，旋转磁场以相反的方向切割定子和转子导体，在合并的相量图中，电动势 $\dot{E}_{2s}$ 与 $\dot{E}_1$ 反相。因为 $s<0$，漏抗压降及 φ_2 均为负值。感应发电机与电网并联运行时的相量图如图3.15-4所示。

自励感应发电机的相量图和等效电路如图3.15-5和图3.15-6所示。

3 感应发电机运行特性

感应发电机的运行特性通常是指其外特性，即在转速和励磁电容值一定时，端电压随负载电流的变化。感应发电机在电网并联运行时端电压不变，这里描述自励感应发电机的运行情况。

图3.15-7给出自励感应发电机的外特性 $U_1=f(I_L)$。在频率和电容量一定情况下，图中曲线1和2分别表示发

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

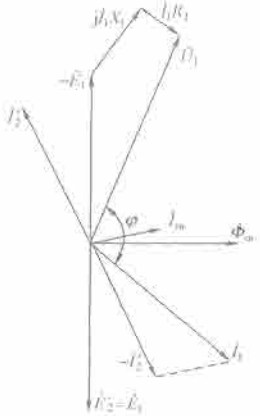


图 3.15-4　感应发电机相量图

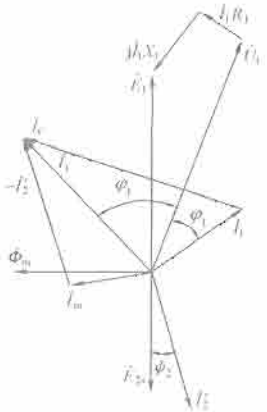


图 3.15-5　自励感应发电机相量图

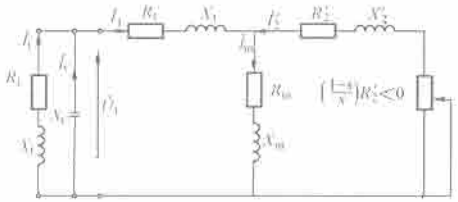


图 3.15-6　自励感应发电机的等效电路

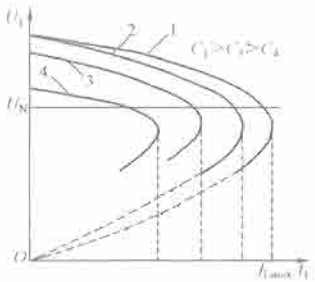


图 3.15-7　自励感应发电机的外特性

电机带纯电阻负载和感性负载时端电压与负载电流的关系。不难看出，发电机带感性负载时，由于负载电流中的无功电流要依靠电容中的容性电流来补偿，此时建立气隙磁场的励磁电流相应地减少，所以感应电动势减少，端电压显著下降。为了维持端电压不变，发电机负载时必须相应地增加电容量数值。发电机的外特性与励磁电容量有关，图中曲线 1、3、4 代表不同的电容量 $C_1>C_3>C_4$ 时的外特性。

从图中还可看到，当负载电流增加时发电机端电压下降，但负载电流超过最大电流值 I_{1max} 后，如果继续减小负载阻抗，负载电流不但不增加，反而会减小。这一点与并励直流发电机的外特性相似。因此，自励感应发电机的短路电流不会很大。

4　励磁电容量计算

三相感应发电机的励磁容量应包括励磁所需容量和补偿感性负载所需无功功率，总无功功率为

$$P_C = P_{1n}(\tan\varphi_1 + \tan\varphi_L)$$

式中，P_{1n}为负载所需有功功率；φ_1 为发电机端电压与定子相电流之间的相位差；φ_L 为发电机端电压与负载电流之间的相位差。

对于小功率发电机，$\tan\varphi_1 = 0.5 \sim 0.7$，而负载功率因数通常在 0.85～0.95 之间，即 $\tan\varphi_L = 0.3 \sim 0.6$。因此励磁电容器所需无功功率的数值约等于负载所需有功功率值。

励磁容量为

$$P_C = 2\pi f C U_C^2$$

当三相电容器组为星形联结时，每相电容器的电容量为

$$C_Y = \frac{P_C}{3}\frac{3}{2\pi f U_L^2} = \frac{P_C}{2\pi f U_L^2}$$

式中，U_L为线电压。

当三相电容器组为三角形联结时，每相电容器的电容量为

$$C_\Delta = \frac{P_C}{3}\frac{1}{2\pi f U_L^2} = \frac{P_C}{6\pi f U_L^2}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

参 考 文 献

[1] 机械工程手册电机工程手册编委会. 电机工程手册. 第2版：电机卷异步电机篇. 北京：机械工业出版社，1996.

[2] 许实章主编. 电机学：下册. 北京：机械工业出版社，1990.

[3] 陈世坤主编. 电机设计. 北京：机械工业出版社，1982.

[4] 黄国治，傅丰礼主编. Y2系列三相异步电动机技术手册. 北京：机械工业出版社，2004.

[5] 傅丰礼，唐孝镐主编. 异步电动机设计手册. 北京：机械工业出版社，2002.

[6] 马志源. 电力拖动控制系统. 北京：科学出版社，2004.

[7] 秦和. 电动机的能效水平及其影响. 中小型电机，2003 (1)：1-13.

[8] 黄国治. 关于美国高效节能电动机. 中小型电机，1997 (1)、(2)、(5).

[9] 秦和. 电动机能效标准国内外综述. 2004第三届中国电机发展论坛专题报告集. 上海：上海电器科学研究所，2004：1-35.

[10] 戴文进，等. 特种交流电机及其计算机控制与仿真. 北京：机械工业出版社，2002.

[11] 高景德，王祥珩，李发海. 交流电机及其系统的分析. 第2版. 北京：清华大学出版社，2005.

[12] 许实章. 交流电机的绕组理论. 北京：机械工业出版社，1995.

[13] 黄弟耀. 电机绕组接线图集. 北京：中国水利水电出版社，1998.

[14] 全国旋转电机标准化技术委员会秘书处编. 中小型电机标准汇编. 北京：中国标准出版社，1998.

[15] 唐孝镐，宁玉泉，傅丰礼. 实心转子异步电机及其应用. 北京：机械工业出版社，1991.

[16] 宋艳文，林艳江. 屏蔽电动机屏蔽套的设计特点及常规问题的预防措施. 防爆电机，2002 (1).

[17] 机械工程手册电机工程手册编委会. 电机工程手册. 第二版. 电机卷小功率电动机篇. 北京：机械工业出版社，1996.

[18] 汤宗武. 单相异步电动机. 杭州：浙江科学技术出版社，1985.

[19] 刘景昌. 家用控制器应用技术手册. 北京：机械工业出版社，1998.

[20] 庞启淮. 小功率电动机应用技术手册. 北京：机械工业出版社，1990.

[21] 杨昭特. 大有作为的PTC起动继电器. 电机电器技术，1998 (2).

[22] 杨昭特. 小型全封闭制冷电动机用电流式起动继电器的选用. 电机电器技术，1998 (4).

[23] 罗洪洪. 离心开关在单相异步电动机上的应用. 电机电器技术，1997 (4).

[24] 庞启淮. 小功率电动机选择与应用技术. 北京：人民邮电出版社，1998.

[25] 国家机械工业局. 中国机电产品目录. 北京：机械工业出版社，2000.

[26] 国家机械工业局西安微电机研究所. 实用微电机手册. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2000.

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第4篇 直流电机

主编单位：哈尔滨电站工程公司
上海南洋电机有限公司
哈尔滨大电机研究所
主　　编：胡鉴清　张石芬　王洁民
编写人员：王洁民(哈尔滨大电机研究所)
胡鉴清(哈尔滨电站工程公司)
张石芬(上海南洋电机有限公司)
陈伟民(上海南洋电机有限公司)
陈立人(上海交通大学)
高文英(哈尔滨电机厂交直流电机有限责任公司)
陈　强(哈尔滨电机厂交直流电机有限责任公司)
徐安廷(哈尔滨电机厂交直流电机有限责任公司)
姜俸全(湘潭电机股份有限公司)

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第1章 概 论

1 特征、分类和用途

1.1 特征

直流电机是一种将直流电能转换成机械能（直流电动机），或将机械能转换成直流电能（直流发电机）的旋转电机。通常所说的直流电机，是指磁极极性沿圆周按N、S极交替排列，利用换向器和电刷对电枢电路内部电流进行换向的异极直流电机。另一类直流电机是应用单极感应原理，不需要进行换向的单极电机。本篇主要讨论前一类直流电机。

1.2 分类

1.2.1 按励磁方式

1）并励，如图4.1-1（a）所示。

2）他励，如图4.1-1（b）所示。

3）串励，如图4.1-1（c）所示。

4）复励，短分路或长分路复励，如图4.1-1（d）和（e）所示。

5）永磁，永磁钢主磁极，不用线圈励磁，如图4.1-1（f）所示。

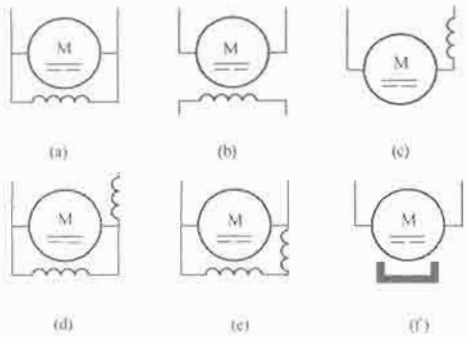


图4.1-1 直流电机的励磁方式

（图中字母"M"代表电动机，发电机时改为字母"G"）

1.2.2 按转速

1）恒速。不论负载大小，电机转速在运行中保持大致恒定。如各类发电机或他、并励电动机。

2）变速。电机转速在运行中有很大变化。如端电压一定、转速随负载变化的串励电动机，或在大转范围内运行的发电机。

3）调速。电机转速在运行中根据需要进行调节。如在额定转速以上进行弱磁衡功率调速的并、他励电动机，在额定转速以下调节电枢端电压进行衡转矩调速的他励电动机。

4）多速。电机可根据需要分级改变转速。如可切换串、并联的双换向器并励电动机。

5）调速变速。电机转速随负载发生变化，而基准转速可以调节。如带分接头以调节基准转速的串励电动机。

1.2.3 按电压、电流

1）恒压。与负载无关、端电压基本恒定的电机。如各种一般用途的发电机和电动机。

2）调压。调节端电压以调节转速的电机。如调节端电压，以恒转矩调速的他励电动机，和与之配套的发电机。

3）幅压。端电压在一定幅度内变化的电机。如蓄电池供电的电动机。

4）恒流。电枢电流基本恒定的电机。如具有可变电压和恒流特性的发电机。

还可按工作制、使用环境、绝缘等级、结构安装型式、防护型式、冷却方式等进行分类。

1.3 用途

1.3.1 直流电动机

因为直流电动机具有以下特性：可频繁快速起动、制动和反转；调速平滑、无级、精确、方便和范围宽广；过载能力大，能承受频繁的冲击负载；能满足自动化系统的各种特殊运行要求等，所以特别适用于宽速比、精调速的场合及有特殊运行性能要求的自动控制系统。由于可用蓄电池电源供电，还可用作停电时的备用电动机，或在特殊环境中使用的电动机。

1.3.2 直流发电机

直流发电机能提供基本无脉动的直流电源，输出电压可精确地调节和控制，主要用作有各种不同要求的直流电源。

1.3.3 其他直流电机

此外，还有三线制发电机和测功、测速、伺服、升压等特殊用途直流电机以及功率扩大机、无槽电机、旋转变流机等非常规结构直流电机。

2 主要技术数据

直流电机在规定的使用环境、运行方式和绝缘等级下的主要技术数据有额定功率、额定电压 、额定转速和励磁电压等。

为了组织标准化、通用化、系列化生产，常常按一定规律建立各种直流电机系列。

以往直流电机系列的额定功率、电压和转速等级常采用硬性等级❶，导致系列内转子品种繁多。在电动机采用晶闸管整流电源供电后，其额定电压不再像用直流发电机供电时那样受到严格限制，直流电动机的额定功率和转速，也不再受硬性等级的约束，基本上可随额定电压成正比变化。按这种原则建立的系列，一种转子可灵活地按需要派生出若干电动机规格，以最少的转子品种获得最多的电机规格，方便用户选用，又有利于标准化零部件生产，特别适用于批量较小、规格繁杂的大中型直流电机。

❶ 硬性等级是指系列电机的额定功率、电压和转速按规定规律进行的分级。同一额定功率可应用于不同的额定电压和额定转速。在硬性等级情况下，直流电机的额定功率在100kW及以下时，等级一般按比值1.35递增；100kW以上时，一般按R10数系递增。额定转速在500r/min及以上时，一般按同步转速分级；而在500r/min以下时，一般按R10数系分级。额定电压按GB 156《标准电压》规定分级。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3 结构

直流电机的结构，取决于机械和电磁负载、运行特性、工作方式以及防护、安装、冷却方式和运输等的要求，一般由定子、电枢（转子）、端盖或端罩、电刷装置、轴承装置和底板（小型和部分中型电机无底板）等部件组成。按需要，有些电机还应配备鼓风机、冷却器、空气过滤器、测速发电机、转速继电器、制动器及其他监测保护装置。

为适应功率、运行特性、通风冷却方式和使用环境条件等的要求，大、中、小型直流电机的结构有明显差别。直流电机的典型结构如图4.1-2所示，其结构安装型式、防护型式、冷却方式等代号和线端标志等参见第1篇第2章。

结构设计的优劣，对提高电机运行可靠性、节约原材料、提高劳动生产率、方便使用和维护有直接影响，具体描述参见本篇第8章。

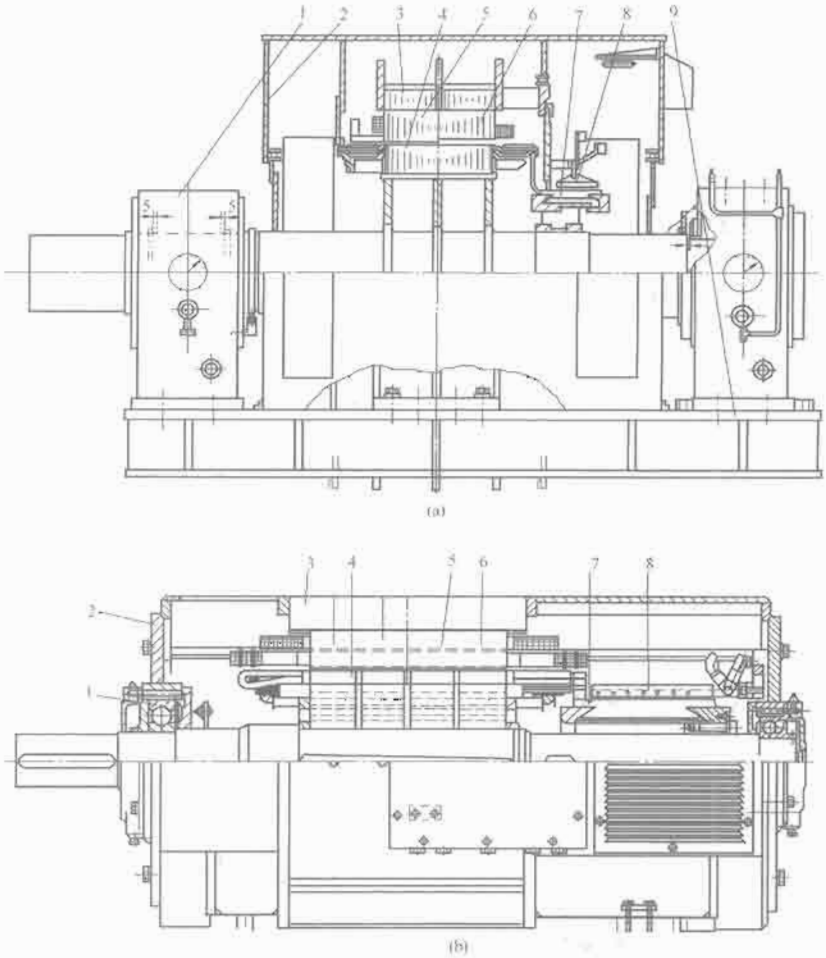


图4.1-2 直流电机剖面图

(a) 大型直流电机；(b) 中小型直流电机

1—轴承；2—端盖（罩）；3—定子；4—电枢；5—主极；6—换向极；7—换向器；8—电刷装置；9—底板

4 直流电动机的质量

直流电动机的质量与额定转矩有关。直流电动机的估计质量与额定转矩的关系如图4.1-3所示。

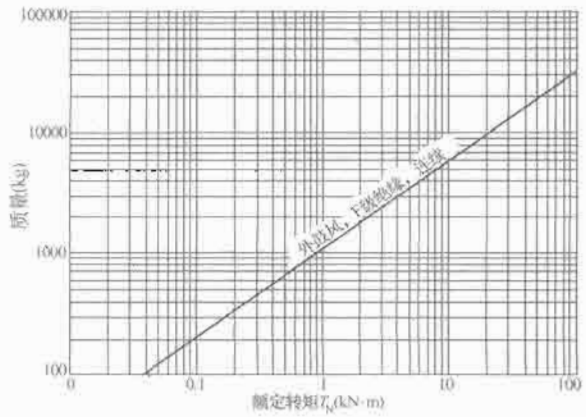


图4.1-3 直流电动机的估计质量与额定转矩的关系

$$T_N = 9.55\frac{P_N}{n_N} \qquad (4.1\text{-}1)$$

式中，T_N为额定转矩，kN·m；P_N为额定功率，kW；n_N为额定转速，r/min。

5 发展趋势

随着电力电子、微电子技术和交流电动机调速与控制技术的发展，许多直流发电机已被各式晶闸管整流电源代替。直流电动机和直流传动系统也在某些领域，特别是大型电机领域，被运行、维护相对方便的交流调速电动机和交流调速系统所取代，应用范围呈缩减趋势。

但是，直流电动机和可以解耦调节的直流传动系统经过长期发展，积累了丰富的运行、维护经验。考虑到交流调速电动机和交流调速系统，在一定容量范围内和一些运行方式中，还存在系统的技术、经济合理性问题，某些运行要求和运行环境还离不开直流系统。因此，在一定时期内，直流电动机和直流传动系统还有发展空间，不能或不宜全面被

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

取代。

面对现实，直流电机的目前发展趋势是：积极采用新技术、新结构、新材料、新工艺，克服晶闸管整流电源供电对电动机带来的换向、绝缘、噪声和振动等方面的新问题。在此基础上，为满足不同机械的特殊要求，完善和发展维护、检测系统，充分发挥直流电动机固有的优良特性，配合与之匹配的晶闸管整流电源系统，设计、制造出适合晶闸管整流电源供电的直流电动机，建立全新的直流电动机新系列。

为此，在下列方面对直流电动机做了大量工作，并取得成果：

1）提高直流电动机的设计、制造水平。利用电子计算机和数值解析技术进行磁场、换向、机械应力、振动及通风冷却方面的解析；结合采用新结构、新工艺、新材料，大幅度提高电磁参数，特别是电枢线负荷；提高电动机的额定电压等级；增加转子铁心长度，提升转子铁心长度和直径的比值，优选最佳设计；采用F、H级绝缘和先进的绝缘结构、真空压力整浸（VPI）工艺，以提高电机的绝缘性能和部件导热性、整体性；推广钨极惰性气体保护焊（TIG）和中频焊等，以提高电接触的可靠性……从而得以提高电动机的换向性能，缩小尺寸，减轻质量，提高极限容量，来适应对电动机动态性能和运行可靠性提出的更高要求。

2）采用新材料，开发新结构。积极向中小型电机推广新型稀土永磁材料；大力开发新结构：如采用多边形定子轭，定子轭和主、换向极铁心均采用叠片结构（小型电机甚至把定子轭与主、换向极铁心做成一体），以提高定子内部空间的利用率和满足电枢电流快速变化的要求；中、小型电机的底脚设置在前、后端盖上，增大底脚支承面，以有利于减少电机振动；改进轴承结构，相应放大轴承和电机轴伸的直径，以适应输出转矩的增加；转子采用高强度无纬带绑扎，尽可能不用槽楔，有些大型电机采用导线变断面的电枢线圈，以降低电枢槽高、改善换向和发热参数；采用特殊换向器结构，以提高工作转速，减少用铜量；发展各种冷却方式，并在小型电机转子铁心上也设置径向通风沟，以改善散热条件……从而最大限度地满足使用要求和提高工程总体合理性。

3）完善、发展维护监测系统。结构复杂、监测困难和维护工作量大，是限制直流电机发展的主要原因之一。采用先进的电机状态监测技术，从局部监测发展到系统监测，开发故障诊断和专家评定系统，进行故障趋势分析，以简化和减少维护工作，保证电机运行可靠。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第2章 工作原理

1 电枢电动势和电磁转矩

直流电机的主极对电刷相对静止；借助换向器和电刷，实现外电路直流电与电枢绕组中交流电之间的相互变换；再借助静止气隙磁场，实现电枢绕组中的交流电能与转轴上的转矩相互转换。这样，通过转轴和电刷分别输入或输出机械功率与电功率，实现机电能量转换。

1.1 电枢电动势

电枢在主极磁场中旋转时，其绕组元件边相对主磁场运动，根据电磁感应定律 $e=Blv$，元件电动势为两元件边电动势之和，而电枢电动势为正负极性电刷间电枢绕组任一并联支路内各串联元件电动势的总和。当电机在电刷处于中性位置运行时，其电枢电动势为

$$E_a = C_e \Phi n \qquad (4.2\text{-}1)$$

式中，Φ 为每极气隙磁通；n 为电枢转速；$C_e = pZ/(60a)$ 为电动势常数，其中 p 为主极对数；a 为电枢绕组并联支路对数，Z 为总导体数，$Z=2SN_s$（S 为电枢绕组元件数，N_s 为每元件匝数）。

根据电机的主极磁场极性与旋转方向，按右手定则决定电枢电动势的极性。同时改变主极磁场极性与旋转方向，电动势极性不变；只改变其中之一，则电动势极性改变。

1.2 电磁转矩

根据电磁力定律，处在主极磁场中的载流电枢绕组的各元件边，都将受到切向电磁力 $f=Bli$ 的作用。当电刷处于中性位置，通过电刷的总电流为 I_a 时，电磁转矩可按下式计算

$$T_{em} = C_T \Phi I_a \qquad (4.2\text{-}2)$$

式中，C_T 为转矩常数，$C_T = pZ/(2\pi a)$。

有槽或无槽电枢结构的电磁力作用部位虽有区别，但它们的电磁转矩均可按式（4.2-2）计算。电磁转矩互相作用在电枢和主极上，其大小相等，方向相反。

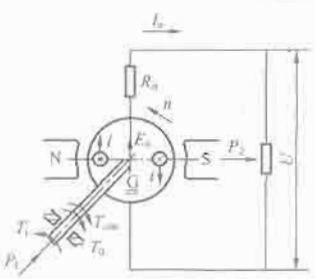
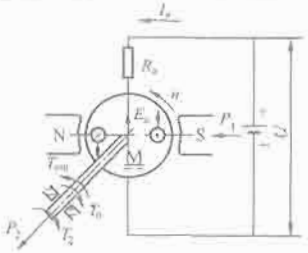
根据电机的主极磁场极性与电枢电流方向，按左手定则决定电枢电磁转矩的方向。同时改变主极磁场极性与电枢电流方向，转矩方向不变；只改变其中之一，则转矩方向改变。

2 电压、转矩和功率平衡

直流电机的能量转换过程是可逆的，既可作发电机运行，也可作电动机运行❶。

直流电机稳定运行时的电压、转矩和功率平衡见表4.2-1。

表 4.2-1 直流电机的电压、转矩和功率平衡

机 种	发 电 机	电 动 机
工作原理	 1. 发电机由原动机拖动，以转速 n（角速度 ω）旋转，输入转矩为 T_1，输入机械功率为 $P_1=T_1\omega$ 2. 发电机运行时，电枢绕组感生电动势 E_a，负载后输出电流 I_a，减去电枢电路电压降，端电压为 U，则输出电功率为 $P_2=UI_a$ 3. 在主极磁场中旋转的载流电枢绕组，使电枢产生与转向相反的反转矩 T_{em}，反转矩的机械功率 $T_{em}\omega$ 被原动机克服，转换成电枢绕组的电功率 E_aI_a，即电功率 $P_{em}=T_{em}\omega=E_aI_a$	 1. 电动机接至端电压为 U 的直流电源，负载后负载电流为 I_a，输入电功率为 $P_1=UI_a$ 2. 电动机运行时，产生电磁转矩 T_{em}，克服负载阻转矩 T_2，以转速 n（ω）旋转，输出机械功率为 $P_2=T_2\omega$ 3. 在主极磁场中旋转的电动机电枢，在其电枢绕组内感应出与 I_a 方向相反的电动势 E_a，称为反电动势。电源用以克服反电动势所消耗的电功率 E_aI_a 转换成轴上获得的机械功率 $T_{em}\omega$，即电功率 $P_{em}=E_aI_a=T_{em}\omega$
电压平衡方程式	$U=E_a-(I_aR_a+\Delta U_b)$	$U=E_a+(I_aR_a+\Delta U_b)$
转矩平衡方程式	$T_1=T_{em}+T_0$	$T_2=T_{em}-T_0$
功率平衡方程式	$P_1=P_{em}+P_0$ $P_2=P_{em}-P_a$ $P_1=P_0+P_a+P_2$	$P_1=P_{em}+P_a$ $P_2=P_{em}-P_0$ $P_1=P_0+P_a+P_2$

注 $\omega=2\pi n/60$；R_a 为电机电枢电路电阻；ΔU_b 为正负电刷的接触电阻压降；T_0 为涡流、磁滞与通风摩擦阻转矩，其作用方向与电机转向相反；P_a 为电枢回路总损耗，$P_a=I_a^2R_a+I_a\Delta U_b$；$P_0$ 为涡滞与通风摩擦损耗，$P_0=T_0\omega$。

❶ 发电机作电动机运行时，为使转速能达到铭牌值，应适当减弱主极磁场或提高电源电压，并适当降低输出功率，使电枢电流不超过铭牌值；电动机作发电机运行时，为使电压能达到铭牌值，应适当提高转速或增强励磁，但励磁绕组温升不应超过允许值。对有串励绕组的直流电机，在改变用途时，应注意将串励绕组引出线作相应改接。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3 电枢反应

直流电机负载时，电枢绕组中的电流将产生电枢磁动势。电枢磁动势轴线所在的空间位置，随电刷的移位而移动，在空间为三角形分布（开槽电枢的绕组电流集中在槽内，在空间为阶梯状三角形分布）。主极气隙磁场将由励磁绕组和电枢绕组的合成磁动势决定，电枢磁动势对主极气隙磁场的影响称为电枢反应。

电枢磁动势按其轴线所在空间位置和对主极气隙磁场的不同影响，有交轴（轴线与主极间几何中心线重合）和直轴（轴线与主极中心线重合）两种，其间夹角为90°电角度。交轴或直轴电枢磁动势对主极气隙磁场的影响，分别称为交轴或直轴电枢反应。

3.1 交轴电枢反应

电刷处在几何中性位置时，电枢磁动势的轴线在交轴上，电枢反应磁动势 F_a 全部为交轴电枢磁动势 F_{aq}。

电枢电流为零，只有主极励磁时的磁场分布如图4.2-1（a）所示；主极无励磁，只有电枢电流流通时，在交轴上产生最大值为 $ZI_a/(8ap)$，按三角形分布的磁动势，此时磁场分布如图4.2-1（b）所示；既有主极励磁又有负载电流时的合成磁场分布如图4.2-1（c）所示。

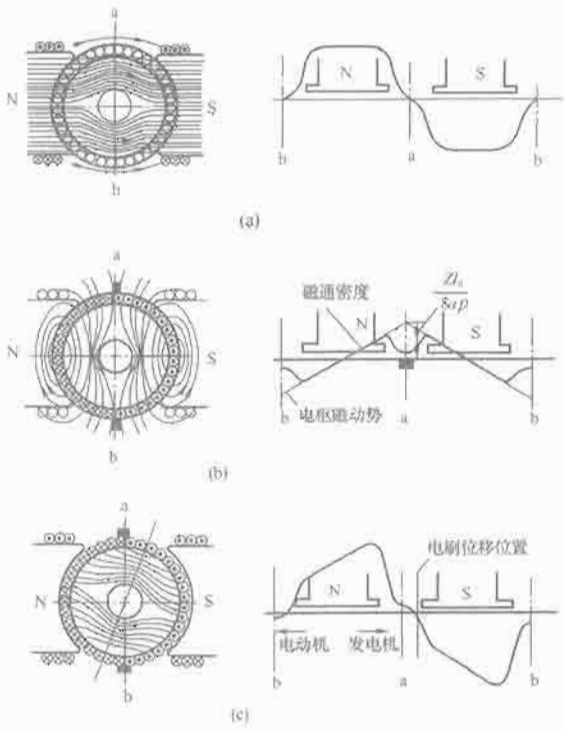


图4.2-1 交轴电枢反应

（a）主极磁场磁通与磁通密度分布；（b）电枢磁动势产生的磁通与磁通密度分布；（c）合成磁场磁通与磁通密度分布

交轴电枢反应的不良影响有：

1）使主极气隙磁场发生畸变，磁路饱和时使有效磁通减少。在有效磁通随着电枢电流增加而减少时，如果保持励磁电流一定，则随着负载电流的增加，会在发电机中引起电压下降，在电动机中引起转速上升，乃至不能稳定运行。

2）使局部换向片片间电压上升。气隙磁场畸变使主极下各元件边的感应电动势不等，导致局部换向片片间电压升高，升高超过一定限值，会引发换向事故。

3）使电机的物理中性线从几何中性位置沿电机旋转方向偏移（发电机前移，电动机反之），如图4.2-1（c）所示。如果电刷仍留在几何中性位置上，该处磁通会在被电刷短路的换向元件内感生电动势，从而产生换向火花。因此，在无换向极的电机中，电刷必须随着负载的改变而改变自己的位置。

交轴电枢反应的不良后果可以采取主极极靴削角，采用偏心气隙等措施加以抑制，或配备换向极、补偿绕组给予补偿。

3.2 直轴电枢反应

当电刷偏离几何中性位置的角度为 α 时，电枢磁动势 F_a 可分解为 F_{ad} 和 F_{aq} 两个分量，如图4.2-2所示。

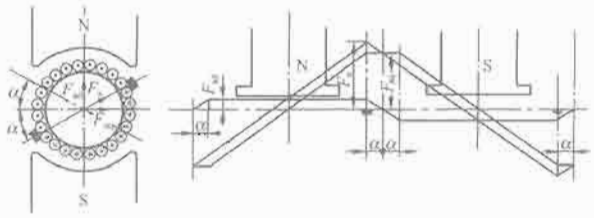


图4.2-2 电枢磁动势的直轴和交轴分量

由几何中性位置两侧 2α 角度范围内的安匝所产生的、轴线在直轴上的分量，称为直轴电枢磁动势 $F_{ad}=2\alpha I_a Z/(360\times 2\alpha)$，其余分量为交轴电枢磁动势 F_{aq}，它们在空间按梯形分布。直轴电枢反应不会造成主极气隙磁场的畸变，只会按电机的工作方式和电刷移动的方向使气隙磁场去磁或增磁，见表4.2-2。

表4.2-2 移刷与气隙磁场的关系

工作方式	顺转向移刷	逆转向移刷
发电机	去磁	增磁
电动机	增磁	去磁

对于单向旋转的电机，在不影响换向性能的前提下，有时可少量移动电刷，利用其增磁或去磁效应来获得所要求的特性。

3.3 换向极和补偿绕组

位于两主极间的几何中性线上，为抵消交轴电枢反应并产生额外磁通，以改善换向而设置的磁极称为换向极。换向极的极性，在发电机中应与电枢旋转方向前面的主极极性相同，在电动机中应与后面的主极极性相同。

换向极的强弱，不仅与换向有关，而且会影响主极磁通。换向极偏强时，电机处于超越换向状态，前刷边的电刷电流密度大于后刷边，换向元件中的电流产生的磁动势直轴分量，使发电机增磁、电动机去磁，相当于逆旋转方向移动电刷；换向极偏弱时，电机处于延迟换向状态，后刷边的电刷电流密度大于前刷边，换向元件中的电流产生的磁动势直轴分量，使发电机去磁、电动机增磁，相当于顺旋转方向移动电刷。

为了更加有效地抵消交轴电枢反应，大中型直流电机常常把换向极线圈中抵消交轴电枢反应的匝数，分散布置到主极极靴上，组成补偿绕组。补偿绕组内电枢电流的方向，应与主极极靴下电枢绕组电流的方向相反。

4 磁路

直流电机的磁路一般指流通主极磁通的主磁路。在有换

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

向极的电机中，还有流通换向极磁通的换向极磁路。

4.1 主磁路

4.1.1 主磁路的组成

主磁路由主极气隙、电枢齿、电枢轭、主极铁心和定子轭组成，如图 4.2-3 所示。主磁路内由励磁绕组产生的磁通，可分成与电枢绕组相交链的有效磁通 Φ 和不交链的漏磁通 Φ_σ。有效磁通与漏磁通的和对有效磁通的比，称为漏磁系数 σ

$$\sigma=(\Phi+\Phi_\sigma)/\Phi=1.15\sim1.2$$

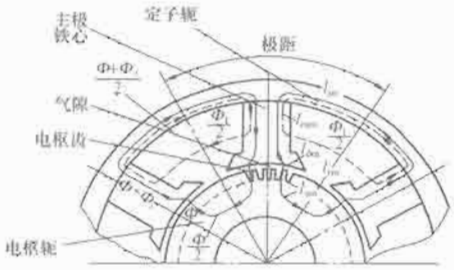


图 4.2-3 直流电机的主磁路

4.1.2 磁化曲线

直流电机的磁化曲线，用每极励磁磁动势 F 与每极有效磁通 Φ 的关系 $\Phi=f(F)$ 曲线表示；也可用空载电动势 E_0 与励磁电流 I_f 的关系 $E_0=f(I_f)$ 曲线表示，称为空载特性曲线。

直流电机的空载特性曲线，是确定直流电机运行特性的基础。关于直流电机的磁化曲线，和负载时电枢反应去磁磁动势的计算，参见本篇第 7 章。

4.2 换向极磁路

换向极磁路类似主磁路，由换向极气隙、电枢齿、电枢轭、换向极铁心和定子轭组成。换向极磁路内由换向极绕组产生的磁通，也可分成有效磁通 Φ_k 和漏磁通 $\Phi_{k\sigma}$。一般换向极漏磁系数 $\sigma_k=(\Phi_k+\Phi_{k\sigma})/\Phi_k=2\sim4$，对换向极极身磁通密度影响很大。为了保持换向极磁动势(电枢电流)与换向极有效磁通间的正比关系，即使在规定的过载条件下，换向极磁路，特别是换向极极身，也不应饱和。因此，换向极极身的磁通密度应取较低的值。

有换向极的直流电机内，由主极、换向极和电枢磁动势共同建立的磁通分布，可用离散模型的数值计算方法求解获得，其二维磁通分布如图 4.2-4 所示。

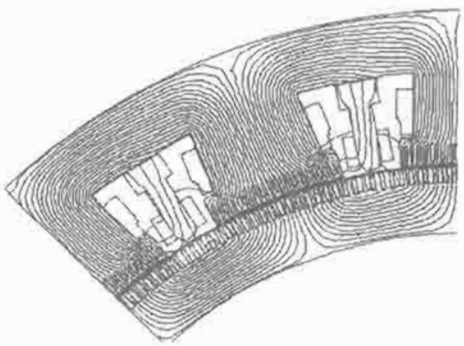


图 4.2-4 直流电动机的二维磁通分布

大中型电机根据换向性能要求，往往在换向极铁心背部和定子轭之间设置第二气隙，与换向极铁心和电枢铁心间的第一气隙相配合，改变磁通的分布，以降低换向极极身磁通密度，改善电机的换向性能，参见本篇第 4 章和第 7 章。

5 电路

除串励电机只有电枢电路外，直流电机的电路可分为电枢电路和励磁电路两部分。

电路要与磁路和其他结构件绝缘。以往，直流电机大多采用 B 级绝缘，现在多数用 F 级，少数用 H 级。根据电机的绝缘等级、工作制和通风冷却方式等选定的电路热负载，应不使损耗引起的温升超过规定值，引起绝缘材料的性能和机械强度变坏，导致缩短电机正常寿命。

5.1 电枢电路

电枢电路内一般包含电枢绕组、换向极绕组、补偿绕组、串励绕组以及换向器和电刷。根据电机的大小和励磁方式，后三种绕组在电枢电路中可能只有两种、一种，甚至都没有。

5.1.1 电枢绕组

电枢绕组是电机感生电动势、产生电磁转矩、实现能量转换的关键部件之一。

常规电枢绕组有波绕组、叠绕组和蛙绕组等。为了改善换向，还有一些特殊电枢绕组，它们的形式、计算和设计分别参见本篇第 5 章、第 7 章和第 8 章。

5.1.2 换向极绕组

换向极绕组通过电枢电流对换向极励磁，以抵消交轴电枢反应，并在电枢的换向元件中感生抵消电抗电动势 e_r 的换向电动势 e_k。应使换向极绕组每极匝数为整数或整数加 0.5。常用改变换向极气隙或换向极第二气隙的方法，满足这个要求。

换向极绕组的计算、设计，参见本篇第 7 章和第 8 章。

5.1.3 补偿绕组

有补偿电机的补偿度 X_c 一般在 80%～105%范围内，X_c 低于 100%的称为欠补偿，高于 100%的称为过补偿。补偿绕组通常在主极极靴上对主极铁心中心线对称分布。为达到某种性能要求，有时也采用对中心线不对称分布，称为补偿绕组的偏位分布。分布在主极极靴上的补偿槽节距，应不是电枢槽节距的整数倍。两者至少应相差 10%，以避免产生额外的振动与噪声。

补偿绕组的计算、设计，参见本篇第 7 章和第 8 章。

5.1.4 串励绕组

串接于电枢电路中的串励绕组，单独或与并（他）励绕组一起给直流电机的主极励磁，根据串、并励磁动势的方向和所占比重，电机获得串励、稳定并励、差复励和积复励（平复励、过复励、欠复励）等运行特性。串励绕组有时还用作平衡两台电机负载的平衡绕组。

串励绕组的计算、设计参见本篇第 7 章和第 8 章。

5.1.5 换向器

换向器是直流电机特有的关键部件。为了保证换向性能和运行可靠性，除要求对它进行精心设计、精心制造外，还应在运行过程中加以精心维护。

在运行中要求换向器无偏心、凸片或呈椭圆状，表面光洁有薄薄一层呈浅褐色的氧化膜，以保证与电刷的滑动接触平稳及高的接触电压降。氧化膜不能过厚，以免厚薄不均影响电刷间电流的均匀分配。为了保护氧化膜，要求换向器表面不附着灰尘或油，周围空间不含化学气体，湿度不能过低或过高，绝对湿度在 5～12g/m³ 范围内，运行温度不宜过低或过高，一般控制在 90 K 以下，超过时特别注意电刷型号

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

的选择。

换向器的计算、设计，参见本篇第7章和第8章。

5.1.6 电刷

在旋转电机上使用的电刷，以炭素材料作主要原料，种类很多，特性各不相同。按使用原料和制造方法，电刷可分成炭和炭石墨、石墨、电化石墨和金属石墨等四大类。直流电机一般采用电化石墨类电刷。

以适当的炭素混合材料作坯料，一次焙烧后放入电炉内进行高温石墨化，再用这种坯料制作的电刷称为电化石墨类电刷。电化石墨类电刷分以下三种：

1）石墨基电化石墨电刷。以石墨为主原料，其润滑性能优良，电阻率小。适用于一般中小型直流电机。

2）焦炭基电化石墨电刷。以焦炭为主原料，机械强度高，摩擦系数、电阻率稍小，研磨性稍弱。适用于中大型换向较困难的直流电机。

3）炭黑基电化石墨电刷。以炭黑为主原料，电阻率高，换向性能优良，多孔质而富研磨性，机械强度稍有下降，易磨耗。适用于中大型换向困难的直流电机。

电刷型号的选择对直流电机至关重要，它直接影响电机的换向性能，参见本篇第4章和第7章。

5.2 励磁电路

励磁电路一般是指主极铁心上给电机提供励磁的并（他）励绕组电路。主极铁心上、串接于电枢电路中的串励绕组电路属于电枢电路（见5.1.4节）。

并（他）励绕组的计算、设计参见本篇第7章和第8章。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第3章 运行特性

1 直流发电机的运行特性

1.1 主要工作特性

直流发电机通常在恒定转速下工作，其端电压U、电枢电流I_a和励磁电流I_f三者之间的关系，表征着它的工作特性。在这三个物理量中，端电压最为重要。

不同励磁方式的直流发电机有不同的工作特性，主要工作特性有空载特性、负载特性、外特性和调整特性，其中空载特性和外特性更为重要。

1.1.1 空载特性

空载特性曲线是表示电枢电动势E_a与励磁电流I_f，或其空载气隙磁通Φ_0与主极励磁安匝$\sum F$之间关系的曲线。空载特性曲线是在发电机状态下，在他励和空载下测得，或通过磁路计算求得，如图4.3-1所示。空载特性曲线能够反映电机工作点的磁路饱和程度，所以显得十分重要。

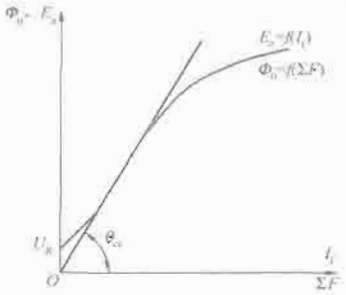


图4.3-1 直流发电机空载特性曲线
（$I_a=0$时）

电机的额定工作点一般选在空载特性曲线的弯曲部分。若磁路过分饱和，建立磁通或电动势需要更多的励磁安匝，将增加电机的损耗和用铜量。若工作点落在空载特性曲线的直线部分，励磁安匝稍有变动，磁通或电动势就有较大的变化，不适合稳定工作的要求。但电机扩大机、有强励要求的励磁机等特殊电机，为了满足通过强励实现快速响应，通常在磁路低饱和状态下运行。

当$I_f=0$时，由发电机所能发出的端电压称为剩磁电压U_R。它是由剩磁感应建立的，其大小主要取决于磁路中磁性材料的特性。一般，剩磁电压约为额定电压的2%～5%。空载特性曲线过原点的切线称为临界电阻线，其对应的电阻值称为临界电阻$R_{cr}=\tan\theta_{cr}$。它反映临界状态下并励发电机励磁电路电压与电阻的关系。

为了满足系统对降低剩磁电压的要求，除选用合适的磁路材料外，还可以设置去磁绕组来降低、乃至消除剩磁电压。

1.1.2 负载特性

负载特性表示电枢电流I_a不变时，发电机端电压U随励磁电流I_f而变化的规律，可由空载特性曲线和负载特性三角形绘出，如图4.3-2（a）和图4.3-2（b）所示。

用空载特性曲线和负载特性三角形绘制负载特性时，△ABC的大小取决于I_a值，AB边平行于I_f轴，表示电枢反应去磁磁动势与串励效应之和，BC边平行于U轴，表示电枢电路电阻压降。电枢反应去磁磁动势、串励效应及电枢电路电阻压降的计算方法参见本篇第7章。

不同励磁方式发电机在电枢电流I_a不变时的负载特性分述如下：

1）他励发电机。负载特性如图4.3-2（a）所示，励磁电流I_f为定值时的直线与空载和负载特性曲线的交点，分别为I_f不变时的空载电压U_{01}和负载电压U_N。

2）并励发电机。负载特性如图4.3-2（a）所示，并励电路电阻线与空载和负载特性的交点，分别为并励电路总电阻不变时的空载电压U_{02}和负载电压U_N。

3）复励发电机。负载特性曲线随串励安匝占励磁总安匝的比例而改变，如图4.3-2（b）所示。U_0和U_N的确定方法与并励发电机相同。当串励增磁效应与电枢反应去磁效应相抵消时，A、B1点重合，负载特性如曲线1；若串励相对偏弱，则B2在A右侧，负载特性如曲线2；若串励相对偏强，则B3在A左侧，负载特性如曲线3。

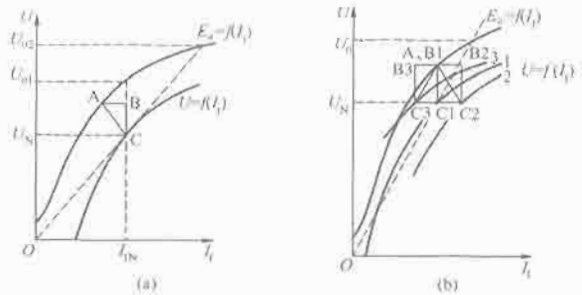


图4.3-2 直流发电机负载特性曲线
（I_a=定值时）
（a）他、并励发电机；（b）复励发电机
1—串励与电枢反应相抵消；2—串励相对偏弱；
3—串励相对偏强

4）串励发电机。电机负载时，端电压随负载变化而变化，不存在保持电枢电流I_a不变的负载特性（串励发电机实用价值不大，有时只在特殊线路中作升压机用）。

1.1.3 外特性

保持发电机转速不变且励磁电路不做调节，端电压U随电枢电流I_a而变化的规律称为外特性。由外特性可以确定不同负载时的电压调整率。影响外特性的因素有：电枢回路电阻压降；电枢反应去磁效应与串励效应之和，其中影响最大的是串励绕组的接法和串、并（他）励的安匝比。不同励磁方式所对应的外特性曲线如图4.3-3所示。

1）他励发电机。负载电流增加时，电枢反应的去磁效应和电枢电路电阻压降相应增大，端电压U随负载电流增加而降低，如图4.3-3所示曲线1。

2）并励发电机。由于励磁电路电阻R_f不变，励磁电流I_f将随着端电压U的降低而减小，从而使端电压进一步下降。随着负载电流增加，至某一最大值I_{cr}（临界电流，一

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

般为额定电流的2～3倍），若负载电阻进一步减少，负载电流不增反减，直至负载电阻降为零时，电流降到仅由剩磁电压和电枢回路电阻决定的短路电流 I_{k0}，如图4.3-3所示曲线2。

3）复励发电机。负载电流增加时，其端电压的变化幅度完全取决于串励绕组的接法和串、并励的安匝比。$U_N=U_0$ 为平复励，如图4.3-3所示曲线3。$U_N>U_0$ 为过复励，如图4.3-3所示曲线4。欠复励时，$U_N<U_0$ 外特性比并励的软，如图4.3-3所示曲线5。差复励时，串励磁动势方向与并励磁动势方向相反，所以端电压 U 随负载电流增加而迅速下降，如图4.3-3所示曲线6，利用此特点，可将差复励发电机作为恒流发电机使用，如直流电焊发电机。

4）串励发电机。由于负载电流就是励磁电流，当负载电流增加时，励磁安匝也随之增加，所以端电压 U 随负载电流增加而增加，如图4.3-3所示曲线7。

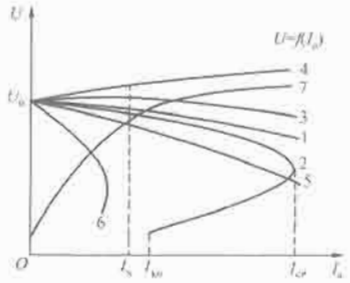


图4.3-3 直流发电机外特性曲线

1—他励（I_f=定值）；2—并励（R_f=定值）；3—平复励；4—过复励；5—欠复励；6—差复励；7—串励

1.1.4 调整特性

负载电流 I_a 增加时，为保持端电压不变，必须相应调节励磁电流 I_f 以补偿电枢反应去磁效应、串励效应和电枢回路电压降，这种励磁电流 I_f 与电枢电流 I_a 之间的函数关系称为调整特性，如图4.3-4所示。不同励磁方式的电枢反应去磁与串励效应之和不同，励磁电流受端电压的影响也不相同，因此在电磁设计时，对于不同励磁方式的直流发电机，在它们各自的额定点应该有不同的励磁裕量。

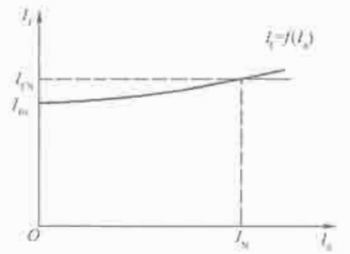


图4.3-4 直流发电机调整特性曲线

（U=定值时）

1.2 固有电压调整率

发电机达到额定运行状态后保持额定转速及励磁调节不变（对他励电机保持励磁电流不变），在负载变化时所出现的电枢端电压变化（一般考虑满载与空载之间的电压变化），称为固有电压调整率 ΔU_N。其数值完全取决于发电机本身的基本特性，可用额定电压的百分数表示

$$\Delta U_N=\frac{U_0-U_N}{U_N}\times 100\% \qquad (4.3\text{-}1)$$

式中，U_0 为在上述条件下的空载电压，V；U_N 为额定负载电压，V。

固有电压调整率可从发电机的外特性曲线求得。

他励直流发电机的固有电压调整率比并励直流发电机的小。复励直流发电机的固有电压调整率取决于其串励绕组的接法和串励在励磁磁动势中所占的百分比，平复励直流发电机的固有电压调整率比他励直流发电机的更小。

1.3 并励发电机的电压稳定

并励直流发电机的励磁电流取于自身，因此它的励磁方式属自励。其端电压的建立必须满足以下三个条件：①发电机要有足够的剩磁；②励磁绕组所产生的磁动势与剩磁极性一致；③励磁电路的总电阻小于临界电阻 R_{cr}。

如果并励发电机的工作点在空载特性曲线的不饱和部分，磁场电阻线与空载特性曲线不是相交于一点，而是有一段重合，发电机端电压就不稳定，如图4.3-1所示。这种情况容易在有强励要求的并励励磁机低电压运行时发生。为了保证自励发电机在整个工作范围内的电压稳定，可以采用非线性电阻作为励磁电路中的调节电阻，使磁场电阻线与空载特性曲线有明确的交点：部分磁路采用剩磁大的材料，提高剩磁电压；也可以在主极极身开槽或在极顶装磁桥，使空载特性曲线在稍低于要求的最低电压时就开始弯曲。

磁桥搭子的总面积（包括磁性磁极固定螺栓总面积），或磁极开槽后开槽部位的剩余铁心面积，决定空载特性曲线上开始倾斜的起始点；磁极开槽或磁桥搭子的高度，决定空载特性曲线的倾斜程度。

1.4 电压调节

调节励磁电流是调节直流发电机端电压的最好方法。他励发电机的励磁电路是独立电路，因此可以一直平稳地调节到剩磁电压。并励发电机的励磁电流在调节端电压的同时，也受到端电压变化的影响，所以电压调节性能不如他励发电机。

为了保持发电机的端电压不受负载变化的影响，励磁电流必须及时作出调整。为此，常采用磁放大器、电机扩大机、晶闸管等无触点自动调节器作为发电机的励磁电源。

发电机端电压调节范围的上限一般不超过110%额定电压。用作同步电机或直流电机的励磁机时，为了使突然下降的电网电压迅速复原，或加速系统的过渡过程，励磁机应具有提高输出电压到额定电压若干倍的强励能力。强励倍数通常为1.4～2，有时会更大。

1.5 电压脉动

由于电的、磁的和机械的不匀称，直流发电机的输出电压会有脉动，如图4.3-5所示。

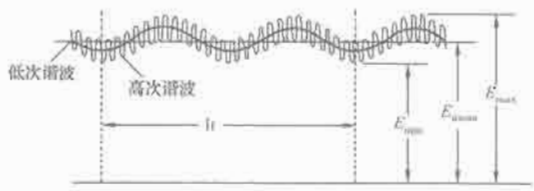


图4.3-5 电压脉动

产生电压脉动的原因复杂，大致可分为低频脉动和高频脉动两大类：

（1）低频电压脉动

1）与原动机连接不同心、机组基础刚度不良及转子动平衡等原因，引起角速度不均匀，导致低频电压脉动。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2）电枢槽节距不均匀、死元件等原因造成电枢圆周表面安培导体分布不均匀，形成低频电压脉动。

3）因气隙不均匀、转子偏心、导磁材料磁导率偏差等原因引起的磁路不均匀，导致每转几次磁通脉动引起的低频电压脉动。

4）电刷接触不稳定，导致低频电压脉动。

（2）高频电压脉动

1）电机以转速 n（r/min）旋转时，由电枢齿槽（槽数为 Q）引起的、频率为 $Qn/60$（Hz）的高频电压脉动。为了减少高频电压脉动，可采用斜槽，或每对极槽数采用分数。如每对极槽数只能采用整数，则采用奇数比偶数好。

2）电机以转速 n（r/min）旋转时，由换向片（片数为 K）引起的、频率为 $Kn/60$（Hz）的高频电压脉动。

为抑制高频电压脉动，可以在电枢回路中接入电容滤波器。

电压脉动对直流测速发电机的运行性能影响较大，因此电压纹波系数（一定转速下，输出电压的交变分量有效值与直流分量之比）是其主要技术性能指标之一。电压纹波系数一般规定为0.05%～0.1%。

1.6 并列运行

当负载大于一台发电机的容量时，或为了在轻载时减少运行台数以提高效率，可以用几台发电机并列运行。此外，对于不允许停电的重要电源，如果用几台发电机并列运行，不但具有备用电机容量小的优点，而且在其中某台发电机因故障而退出运行时，其余发电机仍可继续运行。

为避免各台电机之间形成环流，各台发电机的端电压应相等，且接在同一母线的发电机极性必须相同。为保证并列运行稳定，发电机应具有下降的外特性，因此，一般采用并励、他励或欠复励。差复励发电机外特性太软，对并列运行不利，一般不采用。

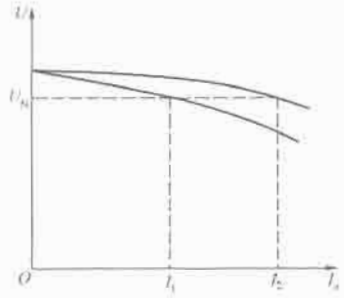


图 4.3-6 发电机并列运行时的负载分配

并列运行时，各发电机之间的负载分配将取决于各自的固有外特性，外特性下倾较陡的发电机分担的负载较小，如图4.3-6所示。

由于两台发电机的外特性不可能完全相同，为保证并列运行的稳定，可以调节发电机的磁动势来自动调节发电机的端电压。一般采用以下几种方法：

1）调节发电机的励磁电流，以改变两台发电机的外特性相对位置。

2）增加相同匝数的增磁和去磁串励绕组并且交叉连接，如图1.3-7所示。如发电机 G_A 比发电机 G_B 的负载增加得多，则发电机 G_A 因去磁磁动势大而使端电压下降，发电机 G_B 因增磁磁动势大而使端电压上升，从而使两台发电机的负载平衡。

3）复励发电机并列运行时，可能由于负载变动使电流向一方倒流，从而使其中一台发电机变成差复励电动机，造成转速异常上升。为防止这种现象的产生，在串励绕组和换向极绕组之间接低电阻的均压母线，如图4.3-8所示。在发电机 G_A 的负载增加时，发电机 G_B 的串励绕组电流也有相应的增加，从而提高 G_B 的感应电动势，使两台发电机负载平衡。

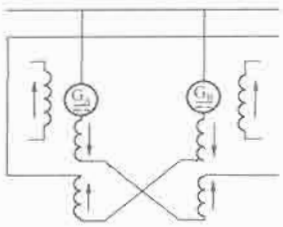


图 4.3-7 串励绕组的交叉连接

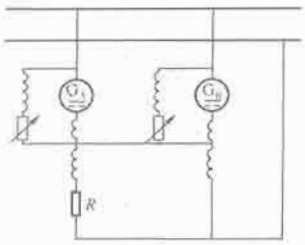


图 4.3-8 复励发电机的并列运行

2 直流电动机的运行特性

2.1 主要工作特性

直流电动机端电压保持恒定，他、并励的励磁电流不变时，其转速 n、电磁转矩 T_{em}、效率 η 与电枢电流 I_a 相互间的关系，分别表征着直流电动机的主要工作特性：外特性（即转速特性或机械特性）、转矩特性和效率特性。其中，转速 n、电磁转矩 T_{em} 是最重要的物理量。

2.1.1 转速特性

转速特性是指电枢电流 I_a 与转速 n 间的函数关系。

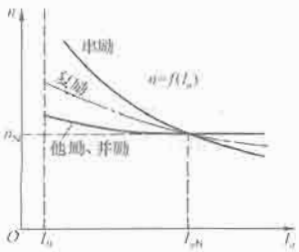


图 4.3-9 直流电动机转速特性曲线

直流电动机的转速 $n=[U-(I_aR_a+\Delta U_b)]/C_e\Phi$。当电压 U 为常数，电枢电流 I_a 变化时，影响转速特性的因素是电枢电路电阻压降与气隙磁通 Φ 的变化。不同励磁方式直流电动机的转速特性曲线如图4.3-9所示。

1）他（并）励电动机。励磁电路不做调节，气隙磁通 Φ 只受电枢反应效应的影响。负载电流 I_a 增大时，电枢电路电阻压降使转速下降，而电枢反应去磁效应使转速上升，综合结果转速变化较小，其转速特性属于硬特性。通常电动机在额定负载时电阻压降的影响较大，转速略为下降。过载时，电枢反应影响增大，转速曲线上翘。

2）串励电动机。由于电机的励磁绕组和电枢绕组串联，电枢电流和励磁电流相等，因此气隙磁通 Φ 主要取决于负载电流的大小，转速随着负载的增加而迅速下降，具有软转速特性。轻载时，励磁电流很小，转速很高。因此，串励电动机不容许空载运行。

3）复励电动机。通常采用积复励，以求运行稳定。他（并）励安匝决定电动机的空载转速，串励安匝使它的转速特性变软。其转速特性介于并励与串励电动机转速特性之间。

2.1.2 机械特性

机械特性表示转速 n 随电磁转矩 T_{em} 变化的函数关系。

从转速—转矩公式 $n=(U-\Delta U_b)/(C_e\Phi)-R_aT_{em}/(C_eC_T\Phi^2)$ 可见，机械特性曲线具有与转速特性曲线相似的形状。电枢电路串入外接电阻后，电动机的机械特性变软。其特性曲线如图4.3-10所示。

2.1.3 转矩特性

转矩特性表示输出转矩 T_2 与电枢电流 I_a 间的函数关系。

直流电动机的输出转矩 $T_2=I_aC_T\Phi-T_0$。输出转矩 T_2 随电枢电流 I_a 变化而改变。空载时，$I_a=I_0=T_0/(C_T\Phi)$；负

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

载时，T_2随I_a的增加而增加，并与Φ随I_a而变的情况有关。不同励磁方式直流电动机的转矩特性曲线如图4.3-11所示。

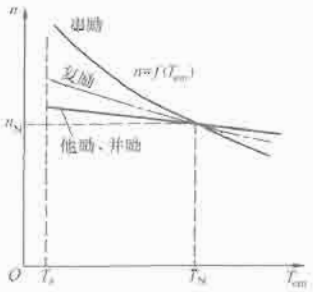


图4.3-10 直流电动机机械特性曲线

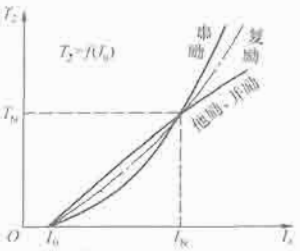


图4.3-11 直流电动机转矩特性曲线

1）他（并）励电动机。轻载时，转矩特性曲线基本上是通过I_0点的直线；过载时，电枢反应去磁作用增强，转矩特性偏离直线，略为向下弯曲。

2）串励电动机。由于磁通随电流的增加而增加，所以I_a较小时磁路未饱和，转矩按I_a^2的关系增大；随着I_a增大，磁路逐渐饱和，且电枢反应去磁效应增加，此时转矩增大变慢。

3）复励电动机。对于积复励电动机，其转矩特性取决于并励安匝与串励安匝之比，且介于并励与串励电动机转矩特性之间。

2.1.4 效率特性

效率特性表示效率η与电枢电流I_a间的函数关系。

效率$\eta=P_2/P_1=1-\sum P/(P_2+\sum P)$，其中总损耗$\sum P$主要包括铁损耗、铜损耗和机械损耗等。空载时，输出功率$P_2=0$，电枢电流为空载电流I_0，输入功率全部供给空载损耗，$\eta=0$；负载时，当铜损耗接近或等于铁损耗与机械损耗之和时，效率最高。对于经常工作于轻载状态下的电动机，一般应使铜损耗大于铁损耗与机械损耗之和；经常过载的电动机则应尽量减小铜损耗。其效率曲线如图4.3-12所示。

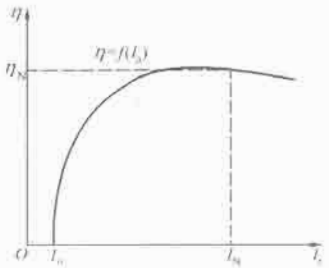


图4.3-12 直流电动机效率特性曲线

2.2 外特性的比较及应用

正常运行时，他（并）励电动机的磁通基本上是恒定的，因此它们的外特性（转速特性或机械特性）是一条稍为下垂的直线，特性比较硬，而且他励电动机在起动、制动和调速方面都具有优越的性能，因此常常被应用于调速范围广、平滑性好、运行稳定性好的场合。

串励电动机的磁通随电枢电流的变化而变化，因此当负载变化时，电动机的转速变化相当大，特别是在轻载时转速过高，这就限制了串励电动机的应用范围。串励电动机与他（并）励电动机相比，在相同的电枢电流过载倍数时，具有更大的起动转矩和过载能力，而且其软特性与电力牵引机车、电动车的运行特性较为吻合。

复励电动机的工作特性介于并励电动机与串励电动机之间，即具有较大的起动转矩，又不至于出现空载时转速过高的现象，所以复励电动机获得广泛的应用。例如，起重机械、冶金行业的轧机辅传动机械等。

2.3 固有转速调整率

在电动机达到额定运行状态后，保持电动机的端电压为额定电压，对他励电机保持励磁电流不变，对复励或并励电机保持励磁调节不变，在负载变化时出现的从满载到空载之间的转速变化，用额定转速的百分数表示，称为电动机的固有转速调整率Δn_N。其值完全取决于电动机的基本特性，可用下式表示

$$\Delta n_N=\frac{n_0-n_N}{n_N}\times 100\% \qquad (4.3\text{-}2)$$

式中，n_0为在上述条件下的空载转速，r/min；n_N为额定转速，r/min。

固有转速调整率可以从转速特性曲线或机械特性曲线求得。

他励和并励直流电动机的固有转速调整率较小，约为2%～15%。一般来说，大容量电动机的固有转速调整率比小容量电动机的小。

复励直流电动机的固有转速调整率，随串励绕组磁动势所占总励磁磁动势的百分比而变化，大多在20%以上。

串励直流电动机由负载电流励磁，所以不允许空载运行。在确定固有转速调整率时，以1/4负载电流时的转速作为空载转速n_0进行计算。

2.4 他励及并励电动机的稳定运行

电动机的稳定运行是指电动机的转速由于电源电压、负载等外部条件发生变化而变化时，不发生振荡或转速不稳定等不正常现象。它与机械负载的运行特性、电动机固有机械特性、控制系统的调节性能等有关。为确保电动机的稳定运行，可以根据实际情况，采取相应的措施。主要措施有：

1）加装少量增磁的串励稳定绕组。在不用补偿绕组的中小型电机中，以及只靠补偿绕组尚得不到充分改善的中大型电机中，可加装少量增磁的串励绕组，以抵消部分电枢反应的去磁作用。在大型电机中，当直接用负载电流给串励绕组励磁而增磁过大时，可以用换向极或补偿绕组的分流电流给串励绕组励磁，但应注意避免由于两条电路时间常数的不同，引起瞬间电流分配发生变化而导致特性的恶化。

加装串励绕组后，为确保串励磁动势和并励磁动势作用的方向一致，在改变电动机旋转方向时必须同时改变串励绕组与电枢绕组之间的接线顺序。

2）加装补偿绕组。对于调速范围较大的小型直流电机和大中型直流电机，常用加装补偿绕组来补偿部分电枢反应的影响。有时单独采用此措施，可能仍得不到充分改善，必要时可使补偿绕组作偏位分布（参见本篇第2章和第7章）。

3）电枢电路内加接电阻。利用电枢电路压降来抵消电枢反应引起的转速上升，但由于铜损耗增加、效率降低，所以一般只用于小电机。

4）使用具有下降特性的电源。如采用差复励直流发电机，利用其较大的电压变化率来遏止电动机转速上升。此方法只适用于单独供电的电动机。

5）采用具有反馈控制的闭环调速系统。现在已被广泛采用。

6）其他方法。无换向极电动机顺旋转方向移动电刷位

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

置，利用直轴电枢反应的增磁作用；有换向极电动机调节换向极磁场强度，利用换向电流产生的直轴磁动势的增磁作用，来补偿部分电枢反应的影响。这些方法都直接影响电动机的换向性能，使用时要十分慎重。

2.5 起动、调速和制动

2.5.1 起动

起动是指接通电源后，电动机转速从零上升到稳定转速的全过程。在这个过程中，其电枢电流、电磁转矩和转速将随着时间的变化而变化。电枢电流和电磁转矩的最大值通常称为起动电流 I_{st} 和起动转矩 T_{st}。

要使电动机起动过程合理，需考虑的问题包括：

1）起动电流 I_{st} 和起动转矩 T_{st} 的大小。

2）起动时间的长短，过程是否平滑。

3）起动过程的能量损耗。

4）起动设备的简单和可靠。

其中电动机能够承受的起动电流倍数 I_{st}/I_N 和起动转矩倍数 T_{st}/T_N 是衡量起动性能的两项重要指标。

为了在允许的起动电流范围内及时地获得尽可能大的起动转矩，除串励电动机外，应先接通励磁电路，并使磁通 Φ 达到最大，然后再接通电枢电源。

直流电动机的起动特性与励磁方式有关。他（并）励电动机的磁通 Φ 基本不变，$I_{st}/I_N \approx T_{st}/T_N$；串励电动机的磁通 Φ 随 I_a 的增加而增加，$T_{st}/T_N > I_{st}/I_N$。因此，当 I_{st}/I_N 值相同时，串励电动机的 T_{st}/T_N 比他（并）励电动机的大，具有更为优良的起动特性。复励电动机的起动特性介于他（并）励电动机和串励电动机之间。

直流电动机有以下三种起动方式：

1）直接起动。电源直接加到电动机上，不需要附加起动设备，操作简便。但由于通电的瞬间电枢处于静止状态，反电动势为零，而电枢内阻又很小，所以起动电流极大，有时可达到 10～20 倍额定电流。这样大的起动电流可能使换向器上产生强烈的火花，甚至引起环火。过大的起动电流，导致过大的起动转矩，引起过大的加速度，产生过大的冲击力可使被传动的机械受到损伤。因此，它只适用于功率不超过 3kW、且 $I_{st}/I_N = 6 \sim 8$ 的小功率电动机。

2）电枢电路串电阻起动。在起动过程中为了限制起动电流，将串入电枢电路的起动电阻逐级切除，直至起动过程结束，切除全部电阻。起动电阻级数越多，起动过程越平滑，但从起动设备简单和可靠性角度考虑，级数不宜过多。这种起动方法的能量消耗大，不适用于大中型和经常起动的直流电动机。

3）降压起动。在整个起动过程中，采用自动控制调节的方法，使电源输出电压逐渐升高，并保持电枢电流为最大允许值，从而使整个拖动系统在较大的加速转矩下平稳地起动。为了使电动机能在整个起动过程中磁通 Φ 保持最大，宜采用他励方式，使励磁不受电源电压的影响。这种起动方式，过程平滑、能量损耗小，但需独立的可调压电源。由于起动性能优良，它已被广泛采用。

2.5.2 调速

直流电动机可在宽广的范围内平滑地调速。当电枢电路接入调节电阻 R 时，转速 n 为

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R) - \Delta U_b}{C_e \Phi} \qquad (4.3\text{-}3)$$

从上式可看到，分别调节电动机端电压 U、串入电枢电路的电阻 R 和励磁电流 I_f，都可以改变电动机的转速特性，从而调动电动机的转速。

（1）调速指标

电动机速度调节性能常用下列各项指标来衡量：

1）调速范围。电动机在额定负载时，所能达到的最高转速 n_{max} 与最低转速 n_{min} 之比 $D = n_{max}/n_{min}$ 称为调速范围。不同的生产机械要求不同的调速范围，例如，机床 $D = 10 \sim 50$，轧钢机械 $D = 3 \sim 10$。

2）调速的平滑性。以电动机两个相邻调速级的转速 n_i 与 n_{i-1} 之比来衡量，比值越接近于 1，调速的平滑性越好。

3）调速的相对稳定性。它反映了负载转矩发生变化时，电动机转速随之变化的程度。工程上常用静差率来衡量调速的相对稳定性。静差率 δ' 是指电动机在额定负载时的转速降 $\Delta n'_N$ 与理想空载转速 n_0 的百分比，$\delta' = (\Delta n'_N/n_0) \times 100\%$。电动机的机械特性越硬，转速降越小，静差率越小。机械特性硬度一样时，低速时的静差率大，相对稳定性差。因此，提高电动机低速时的机械特性硬度，减小静差率，不仅可以保证电动机稳定运行，还能扩大其调速范围。

4）调速的经济性。由调速设备投资和电动机运行时的能量消耗及维修费用来决定。

5）与负载的匹配程度。不同的生产机械设备在调速时，轴上的负载转矩和功率变化分恒转矩和恒功率两类。根据电动机在不同励磁方式下的机械特性，选择合适的电动机调速方法，以适应生产机械设备负载调速的特定要求，使电动机能被充分利用。

（2）他、并励电动机的调速

1）调节励磁电流（弱磁）调速。如图 4.3-13 所示，此时端电压 U=常数，转速 n 将随励磁电流 I_f 和磁通 Φ 的减小而升高，保持电枢电流维持不变，即可实现弱磁恒功率调速。但是转速越高，换向越困难，电枢反应和换向元件中电流的去磁效应对电动机运行稳定性的影响也越大，而且电动机的最高转速还受机械因素的限制，因此弱磁调速的调速范围不大，普通电动机 $D = 1.5 \sim 2.5$，特殊设计电动机 $D = 3 \sim 5$。

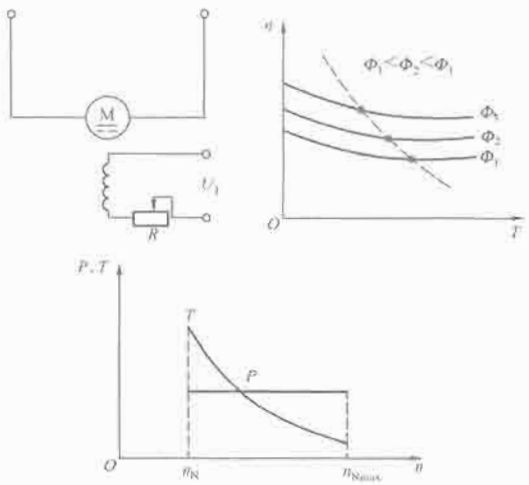


图 4.3-13 调节励磁电流调速（弱磁调速）

由于正常工作时，电动机的磁路已趋饱和，增磁调速效果不明显，因此，这种调速方法只适用于额定转速以上的调速。

2）调节电枢端电压（调压）调速。如图 4.3-14 所示。此时励磁电流 I_f=常数，磁通 Φ=常数，转速 n 将随端电压 U 的减小而降低，保持电枢电流不变，即可实现降压恒转矩调速。低速时，机械特性的斜率基本不变，相对稳定性较

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

好，所以调速范围较广。

由于受到耐压等级等因素的限制，电动机一般不允许超过额定电压运行，这种调速方法只适用于额定转速以下的调速。

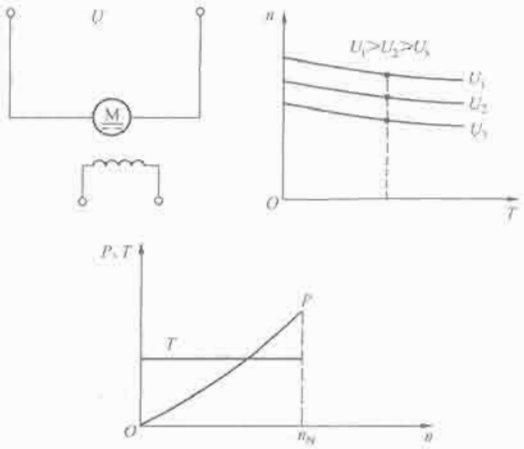


图 4.3-14 调节电枢端电压调速（调压调速）

采用这种调速方式还可用来降压起动，以控制起动电流。还可在制动时采用回馈制动，将系统的动能反馈回电网。

3）调节电枢电路电阻（串联电阻）调速，如图 4.3-15 所示。保持电动机端电压 U 和励磁电流 I_f 不变，电动机转速 n 随着串入电阻 R 的阻值增加而降低。但转速越低机械特性越软，影响电动机运行的稳定性；串入的电阻越大，电阻的损耗越大，效率越低。上述因素限制了电动机的调速范围，一般 $D=2\sim3$。保持电枢电流 I_a 不变时，电磁转矩 T_{em} 保持不变，因此，这也是一种恒转矩调速。

这种调速方式具有设备简单，操作方便的优点，但只适用于额定转速以下，不经常调速，调速平滑性要求不高，机械特性要求不高的调速。

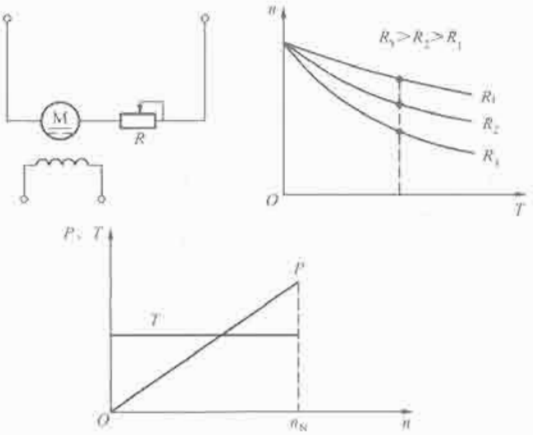


图 4.3-15 调节电枢电路电阻调速（串联电阻调速）

由独立的电压可变电源供电的他励直流电动机，常在额定转速以上作弱磁恒功率调速，并在额定转速以下作降压恒转矩调速，以扩大调速范围。通过端电压（或磁场）正反向变化，使电动机正反向旋转，还能进行能量反馈。

（3）串励电动机的调速

1）调磁调速。通过调节磁场进行调速，可分为：

①励磁分流调速。在串励绕组两端并联分流调节器，通过分流励磁电流来调节转速。分流调节器还应串接电抗器，以防止因串励绕组与分流支路时间常数不同，而在电流剧变时动态分流率相对稳态分流率发生变化，使电动机性能恶化。

②切换串励绕组分接头调速。在串励绕组上设分接头，通过分接头切换进行调速。由于分接头数有限，这种方式只能有级调速。

③串励绕组串、并联调速。把串励绕组一分为二，通过两种绕组接线方式的串、并联变换进行调速。这种方式的最大弱磁率为全励磁的 25%～30%。

2）调压调速。通过调节端电压进行调速，可分为：

①斩波调速。这种方式电流脉动大，必须注意换向和温升。这种方式能实现无级调速，运行效率高，能进行回馈制动，已被广泛应用，尤其是牵引电机。

②串、并联调速。由几台规格相同的电动机驱动同一负载，通过把电动机的电枢电路接成串联或并联，以改变电动机的端电压进行调速。在电力牵引电动车中，串、并联调速结合串联电阻调速，具有运行效率高，调速范围宽的特点。

3）串联电阻调速。通过调节串联在电枢电路中的电阻进行调速。与他、并励电动机一样，存在运行效率低的缺点，但串联电阻可以兼作起动器，且调速范围比调磁调速的范围宽，调速平滑性好，在电力牵引中被广泛采用。

（4）复励电动机的调速

可以和他励电动机一样进行调磁调速、调压调速。但在串励绕组励磁磁动势起主要作用的电动机，其机械特性较软，所以调磁调速和调压调速的范围都有所减小。

2.5.3 制动

为使电动机迅速停转、减速或限制其转速过分升高，除采用机械制动以外，通常采用使其电磁转矩与旋转方向相反的方法进行电磁制动。直流电动机的电磁制动有能耗制动、电源反接制动和回馈制动（再生发电制动）三种。

直流电动机对电磁制动的要求与起动基本相同，即制动时要有足够大的制动转矩（以电动机及其传动机构不致受到过大的冲击而损伤为宜），制动电流不要超过电动机换向所允许的数值，一般为 2～2.5 倍的额定电流。

（1）能耗制动

保持励磁不变，电枢电路从电源切断，接入合适的制动电阻，电枢电流反向，使电机的电磁转矩与电机转向相反而制动，原理图如图 4.3-16 所示。

此时，电机处于发电机状态，向制动电阻供电，机组的惯性动能转化为制动电阻与机组本身的损耗。由于制动转矩随转速成正比地减小，影响制动效果，因此，转速降低到一定程度后，常与机械制动配合使用。

能耗制动过程较为平稳；控制线路简单可靠；便于实现准确停车。适用于机组停转。

（2）反接制动

保持励磁不变，电枢电路与电源经一个限流电阻作反极性串联，电枢电流反向，使电磁转矩与电机转向相反而制动，原理图如图 4.3-17 所示。

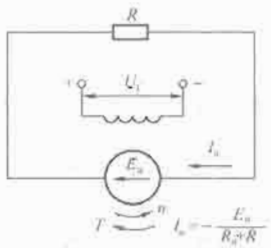


图 4.3-16 能耗制动原理图

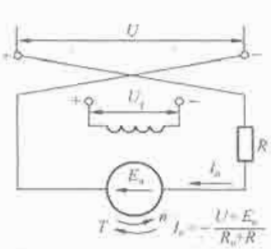


图 4.3-17 电源反接制动原理图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

此时，电机处于发电机状态，并与电源串接向限流电阻供电。电源电能与机组的惯性动能转化为限流电阻与机组本身的损耗。转速降低后仍有良好的制动效果，但消耗一些电源电能。如要避免电动机反转，必须在电动机停转时，及时切断电源。如有必要，辅以机械制动，既能防止发生反转再起动，又能保证电动机准确停车。

采用电源反接制动制动转矩较恒定，制动效果好。但需从电网中吸收电能，不及时切断电源，会自行反向加速。常用于要求迅速制动、停转、反转的场合。

(3) 回馈制动

保持励磁不变，当转速升高到大于电动机空载转速时 $E_a>U$，电枢电流反向，使电磁转矩与电机转向相反而制动。制动时，电机处于发电机状态，使电动机加速的动能转化为电能向电网回馈。原理图如图 4.3-18 所示。

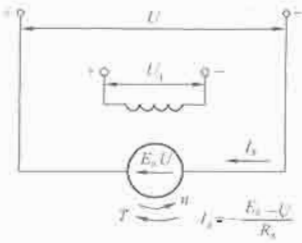


图 4.3-18 回馈制动原理图

采用回馈制动方式，在制动过程中不消耗电网电能，且可回收电能；无须改变接线即可自动转化到制动状态；电能反馈到电网，简便可靠而经济。但是，此方式只能出现在 $n>n_0$ 时，应用范围较窄。采用回馈制动时，应对电动机进行过电压保护，防止不能回馈时电压升高的危害。

回馈制动除用于旋转部件的减速制动外，还用于限速制动，如位能性负载的稳定下降、电力机车下坡等。

在复励电动机中，制动时应反接串励绕组或使之他励。串励电动机，由于无法实现 $E_a>U$，所以不存在回馈制动。

2.6 电动机的供电电源

早期的直流电动机电源是交流电动机驱动的直流发电机。通过调节直流发电机励磁，使直流发电机输出电压在改变端子正、负极性的两种情况下都能从零平滑地变化到最大值，不需要改变接线，即可实现直流电动机的正反转、制动和回馈，实现额定转速以下的恒转矩调速和额定转速与最高转速之间的恒功率调速。

随着电力电子技术、微电子技术和计算机技术的发展，各种晶闸管整流电源已成为直流电动机的主要供电电源。晶闸管整流电源与直流发电机组相比，除了保持原来直流发电机组输出特性以外，还具有调节方便、响应快、系统的效率高、没有旋转体因而噪声小、日常维护工作量小的特点。但是与直流发电机组相比，其直流侧输出中含有相当大的脉动分量，这对直流电动机的正常运行带来了一定的影响，因此必须对晶闸管整流电源和电动机本身采取相应的措施（对电动机的措施参见本篇第 6 章）。

在某些特定的使用场合，如电动车用直流电动机等，仍将蓄电池组作为直流电动机的供电电源。

2.7 电动机的同轴运行

为减小传动系统的转动惯量，或者由于受到电动机本身输出功率或最高机械转速的限制，有时用两台或两台以上相同规格的电动机同轴传动。同轴运行时，各台电动机的负载分配由其机械特性而定。

同轴传动的多台电动机，它们的主电路之间或励磁电路之间可以分别采用串联接线或并联接线。为了使同轴传动且规格相同的电动机负载分配尽可能平衡，无论励磁电路采用哪种接线方式都应该使它们的励磁电流尽可能相同。

当主电路采用串联接线时，各台电动机具有相同的电枢电流，而它们的机械特性不可能完全一致，使得各台串联电动机的端电压有差异。当主电路采用并联接线时，各台电动机具有相同的端电压，而由于各台电动机的机械特性不完全一致，使得并联运行的电动机电枢电流有差异。

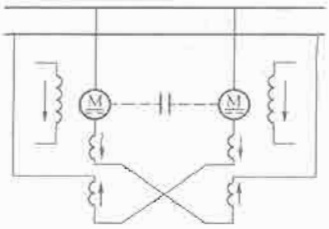


图 4.3-19 具有平衡绕组的电动机并联接线

为使两台并联接线的电动机负载分配均匀，可以在电枢电路内串接差动平衡绕组，平衡绕组分成两半装在主极铁心上，并且在两台电动机之间交叉连接，如图 4.3-19 所示，形成差动平衡的作用。当负载分配均匀时，两套绕组产生的磁动势相互抵消；当负载分配不均匀时，负载大的电动机其平衡绕组起到增磁作用，负载小的电动机其平衡绕组起到去磁作用。这样，通过调整两台电动机的磁通，改变了各自的机械特性，从而减小两电动机负载分配的不均匀程度。但这种接法只适用于单向旋转的电动机，因为随着电动机旋转方向的改变，平衡绕组所起的作用恰好相反。

3 直流电机的动态特性

电机运行状态有两种：一种是稳定状态，另一种是过渡状态，也称过渡过程。在电力拖动系统中，由于转矩平衡关系被破坏，从而导致系统从一种运行状态向另一种运行状态过渡。电动机在起动、制动、调速以及电气参数或负载转矩突然变化时都处于过渡过程中。电机的动态特性是指电机在过渡过程中的特性。对变化快速性或过渡过程品质有较高要求的某些场合，电机的动态特性是很重要的技术指标，主要有电动机的机电时间常数、励磁电路时间常数、电枢电路时间常数、电动机能够承受的电流变化率等。

3.1 电动机机电时间常数

电动机的机电时间常数 T_m 是电力拖动系统中一个十分重要的动态参数。电机时间常数 T_m 较小的拖动系统其过渡过程进行得较快，反之过渡过程进行得较慢

$$T_m=\frac{\sum GD^2}{375}\frac{\sum R_\delta}{C_e C_T \Phi_N^2} \tag{4.3-4}$$

式中，T_m 为电动机的机电时间常数，s；$\sum GD^2$ 为整个系统的惯性，即折算到电动机轴上的负载飞轮惯量与电动机的飞轮惯量之和，$N\cdot m^2$；$\sum R_\delta$ 为包括电枢电路电阻 R_a 和外接附加电阻 R_{ad} 在内的总和，Ω；C_e 为电动势常数；C_T 为转矩常数；Φ_N 为电动机每极额定磁通，Wb。

由式 (4.3-4) 可见，T_m 的大小与 $\sum GD^2$ 成正比，而一般电动机的 GD^2 在整个系统的惯性中占相当的比例。电动机 GD^2 与 $D_a^4 L_a$ 成正比，所以为了减小 T_m，在选择电枢直径 D_a 和铁心长度 L_a 时，应尽可能选择小直径和长铁心，必要时采用多电枢电动机来代替单电枢电动机，以减小电动机本身的 GD^2。

3.2 励磁电路时间常数

励磁电路时间常数 T_f 反映了励磁电压变化时，励磁电流随之变化的快慢程度，是主极励磁绕组的电感与励磁电路总电阻的比值，即

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$T_f = \frac{L_f}{\sum R_f} \tag{4.3-5}$$

式中，L_f为主极励磁绕组电感，H；$\sum R_f$为包括主极励磁绕组电阻和外接附加电阻在内的励磁电路电阻总和，Ω；L_f为主极励磁绕组电感，即单位电流的磁链，其经验公式为

$$L_f = 2p\sigma N_f \frac{\Phi}{I_f} \tag{4.3-6}$$

式中，p为主极对数；σ为主极漏磁系数；Φ为对应点的磁通量，Wb；N_f为主极励磁绕组每极匝数；I_f为对应上述磁通的励磁电流，A。

若主极上还有其他相当于短路的绕组，而绕组之间又相互耦合，则励磁电路时间常数会受到这些因素的影响而增大。

在工程计算中，忽略电枢反应、磁路饱和等原因引起的非线性影响，由励磁电路的电压平衡方程式可以得到在额定励磁电压下，当励磁电流从零上升时的励磁电流动态方程

$$I_f = I_{fw}(1 - e^{-t/T_f}) \tag{4.3-7}$$

式中，T_f为励磁电路时间常数，s；I_{fw}为励磁电流稳态值，A。

由式（4.3-7）可见，励磁电流动态特性为指数曲线。当$t = T_f$时，I_f上升至I_{fw}的63.2%；而当$t = 4T_f$时，I_f接近I_{fw}即达到工程意义上的稳态值。由此可见，励磁电路时间常数T_f的大小，可以反映励磁过渡过程的快慢。

一般来说，励磁回路时间常数T_f随电机的容量和尺寸的增加而增大。小容量直流电机的T_f只有零点几秒，而中等容量和大容量直流电机的T_f大约几秒。

某些拖动系统对其起制动过程的动态性能有特定的要求，需要加快或延缓直流电机的励磁电路过渡过程，此时可以通过调整励磁电路中的附加电阻，或采用闭环励磁调节的方法。近年来普遍应用的晶闸管整流励磁电源，多采用闭环励磁调节的方法，通过改变励磁电流变化率来改变励磁电路过渡过程的快慢。

需要注意的是，当采用强迫励磁的方法来增大励磁电流变化率时，电机励磁绕组的绝缘结构应能承受相应瞬间高电压的冲击。对于励磁电源，也应该确保当强迫励磁过程结束以后，将励磁绕组中流过的电流控制在额定电流以下。

励磁绕组电感的测定方法见GB/T 1311《直流电机试验方法》。

3.3 电枢电路时间常数

电枢电路时间常数T_a，也称电枢电路电磁时间常数，反映电枢电压（或电动势）变化时，电枢电流随之变化的快慢程度，是电枢电路总电感$\sum L_a$与电枢电路总电阻$\sum R_a$的比值。

$$T_a = \frac{\sum L_a}{\sum R_a} \tag{4.3-8}$$

式中，T_a为电枢电路时间常数，s；$\sum L_a$为电枢电路电感L_a和外接的附加电感（如平波电抗器的电感）L_{ad}的总和，H；$\sum R_a$为电枢电路电阻R_a和外接附加电阻R_{ad}在内的电阻总和，Ω。

电枢电路绕组电感L_a可根据电机各部分尺寸，由导体的磁链数求得，其不饱和值可按下列经验公式计算

$$L_a = 19.1C_x \frac{U_N}{2pI_N n_N} \tag{4.3-9}$$

式中，L_a为电枢电路电感，H；U_N为电机额定电压，V；I_N为电机额定电流，A；n_N为电机额定转速，r/min；C_x为电感系数，无补偿发电机取0.6，有补偿发电机取0.2，无补偿电动机取0.3～0.4，有补偿电动机取0.1～0.15。

电枢电路电感的饱和值较其不饱和值小，磁路越饱和，其饱和值越小。

电枢电路电感也可由试验测得。将串励绕组开断，固定电枢，防其转动，电枢电路加以单相50Hz交流电压，电流应控制在20%额定电流左右，同时读取交流电压与交流电流、相角或功率。电枢回路电感试验值可按下式计算

$$L_a = \frac{U\sin\theta}{2\pi f I} \tag{4.3-10}$$

式中，U为交流电压有效值，V；I为交流电流有效值，A；θ为交流电压与交流电流间的相角；f为频率，Hz。

当主极励磁绕组短接，测得的电感值是不饱和电感。当主极励磁绕组他励，并通以额定励磁电流时测得的电感值是饱和电感。具体的测定方法见GB/T 1311《直流电机试验方法》。

3.4 电流变化率

在动态性能有较高要求的电力拖动系统中，提高直流电动机的加减速力矩是一种常用的方法。由于他励直流电动机在励磁电流不变的条件下输出转矩与电枢电流成正比，因此系统对电动机电枢电流上升速率提出较高的要求。一般要求电动机能承受每秒200～250倍额定电流的电流变化率。

由于直流电机换向极磁路中涡流的阻尼作用，使得换向极磁通的变化远远落后于电枢电流的变化，影响电机的换向性能，必须采取相应的措施（参见本篇第4章）。

电机电流变化率的测定方法见GB/T 1311《直流电机试验方法》。

3.5 短路电流

直流电机电枢电路两端发生短路时，在电枢电路内流过如图4.3-20所示的电流。此电流可以用电机的详细设计数据计算。

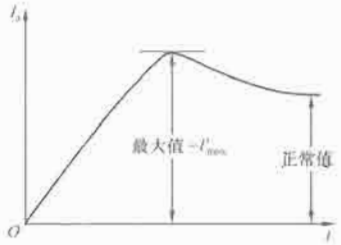


图4.3-20 短路电流的变化

短路后瞬间的电流上升率是选择保护回路中的断路器、熔断器等的容量的依据，可按下式计算

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{U_N e_0}{L'_a} \tag{4.3-11}$$

式中，di_a/dt为电流上升率，A/s；U_N为电机额定电压，V；e_0为短路前瞬间感应电动势标么值（在额定电压下短路时，发电机为1.03，电动机为0.97）；L'_a为电枢电路不饱和电感，H。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第4章 换 向

旋转着的电枢绕组元件从一条支路进入另一支路时，在被电刷短接的过程中，元件内电流发生改变大小和方向的变化称为换向。

换向过程十分复杂，它不仅是电磁的变化过程，同时还受到负载、电刷材质、机械、化学和环境等各种因素的影响。目前掌握的关于换向的理论分析和计算，能近似地反映这个过程的物理本质、指导实践。对换向理论和改善换向的措施仍在进一步研究。

换向不良时将会出现强烈火花，造成换向器表面和电刷损坏，进而使电机不能继续运行。因此，换向性能是直流电机运行品质的重要指标。

1 换向过程的基本概念

在换向过程中，被电刷短接的绕组元件称为换向元件。稳定运行时，换向元件中电流换向的过程如图 4.4-1 所示。电枢旋转时，换向元件中的电流 i 随时间而变，当电刷与换向器的相对位置为刷位（1）时，$i=+i_a$（i_a为电枢绕组支路电流），元件开始换向；在刷位（2）时，元件正在换向中；至刷位（3）时，$i=-i_a$，元件结束换向。换向元件从开始换向到换向结束所经历的时间，称为换向周期 T_k，历时甚短。在此期间电刷与换向器的相对位移称为电刷计算宽度。电刷计算宽度 b'_b和换向周期 T_k 可按下式计算

$$b'_b = b_b + \left(1-\frac{a}{p}\right)t_k \tag{4.4-1}$$

$$T_k = \frac{b'_b}{v_k} = \beta_i T_s \tag{4.4-2}$$

式中，b_b为电刷宽度；a 为电枢绕组支路对数；p 为极对数；t_k为换向片距；v_k为换向器表面线速度；$\beta_i = b'_b/t_k$为计算电刷覆盖片数；$T_s = t_k/v_k$为换向器转过一个换向片距所需的时间。

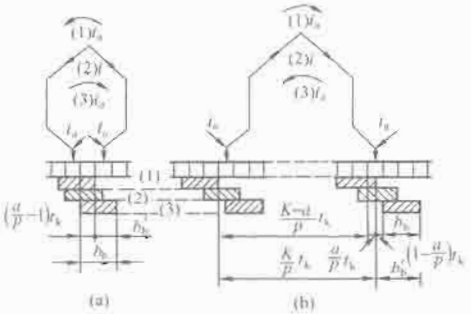


图 4.4-1 换向过程

（a）叠绕组；（b）波绕组

叠绕组和波绕组（参见本篇第 5 章）的换向过程在本质上并无区别。在叠绕组中，换向元件被同一块电刷短接。在波绕组中，当刷杆数等于极数时，被两块相同极性的电刷所短接。

在换向过程中，有时会在电刷下出现换向火花。电刷下的微弱火花对电机运行并无危害，但强烈的火花将使电机不能正常工作，尤其在某些不利条件下，如果在正负电刷间形成环火，将使电机受到严重损坏。

换向火花主要是由于换向元件与电刷所组成的回路中的电磁原因造成的。某些机械因素，如电机振动、换向器偏心或凸片、刷握弹簧压力不当、电刷在刷握中不正常跳动，以及电刷与换向器滑动接触受化学与电离作用的影响等，对形成换向火花也有密切关系。

1.1 换向元件中的电动势

在换向过程中，由换向元件与电刷所组成的闭合回路中，存在三种不同性质的电动势：电抗电动势、旋转电动势和变压器电动势。

1.1.1 电抗电动势

绕组元件通过电流时，在元件的槽部、端部和齿顶将产生漏磁通。换向元件中的电流变化时，漏磁通也随之变化。由漏磁通变化在换向元件中所感生的电动势，称为电抗电动势 e_r。电抗电动势包括换向元件本身的漏磁自感电动势 e_L和同时进行换向的同槽其他元件在该元件中所产生的漏磁互感电动势 e_M，即 $e_r = e_L + \sum e_M$。根据电磁感应定律，电抗电动势的方向与其换向前的电流方向相同，它阻碍换向元件中电流的变化，不利于换向。

1.1.2 旋转电动势

换向元件相对换向区内的外磁场旋转时所感生的电动势，称为旋转电动势 e_ω。旋转电动势的方向取决于外磁场的极性与电机的旋转方向。旋转电动势的方向与电抗电动势的方向相反时，将加速电流的变化，有利于换向。不同结构的直流电机，其换向区内的外磁场和换向元件中旋转电动势的性质和方向见表 4.4-1。

表 4.4-1 外磁场与旋转电动势的性质

电机结构		换向区内的外磁场	换向元件中的旋转电动势
有换向极①		换向极磁场 B_k	换向电动势 e_k，方向应与 e_r相反
无换向极	电刷在中性位置	交轴电枢反应磁场 B_{aq}	交轴电枢反应电动势 e_{aq}，方向与 e_r相同
	电刷偏离①中性位置	气隙合成磁场 B'_δ	气隙磁场电动势 e_δ方向应与 e_r相反

① 换向极的极性与电刷应偏离的方向参见本章 3.1 和 3.2 节。

1.1.3 变压器电动势

电枢绕组元件在被电刷短接的过程中，其轴线基本上与主极同轴。由于主极磁通随时间而变，在换向元件中所感生的电动势称为变压器电动势 e_t。

开槽电枢旋转时所引起的主极磁路磁导脉动，脉动电流励磁时主极磁动势的脉动，发电机端电压或电动机转向的快速反向，特别是强行励磁时主极磁通的快速变化，均将在换向元件中引起变压器电动势。脉动产生的变压器电动势对电机的换向性能影响不大，而快速反向或高强励倍数的强励将使电机的动态换向性能恶化。

若取元件换向前的电流方向为换向元件回路的参考方向，与回路参考方向相同的电动势为正值，相反的为负值，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

则换向元件回路内的合成电动势为

$$\sum e = e_r + e_\omega + e_i$$

在稳态运行且不计变压器电动势时，换向元件回路内的合成电动势为

$$\sum e = e_r + e_\omega \tag{4.4-3}$$

1.2 换向元件中的电流

换向元件中的电流可通过相互间存在电磁耦合关系、且同时换向的各换向元件回路的电压方程联立求解获得。在电刷覆盖一片换向片的单叠绕组换向元件回路中，若不计元件及引线电阻，并假定电刷接触电阻与接触面积成反比，则换向元件中电流 i 的变化为

$$i = i_1 + i_k \tag{4.4-4}$$

$$i_1 = \left(1 - 2\frac{t}{T_k}\right) i_a \tag{4.4-5}$$

$$i_k = \frac{\sum e}{R\left(\frac{T_k}{t} + \frac{T_k}{T_k - t}\right)} \tag{4.4-6}$$

式中，i_1 为直线换向电流；i_k 为附加换向电流；i_a 为电枢绕组支路电流；R 为换向片被电刷全部覆盖时的接触电阻。

在换向过程中，换向元件中电流 i 的变化情况，按其中 $\sum e$ 的不同，有直线换向、延迟换向和超越换向三种基本类型，其特征如图 4.4-2 所示。

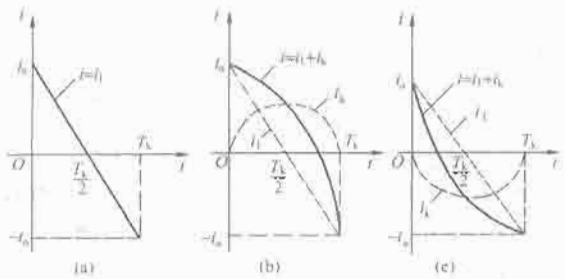


图 4.4-2 换向元件中的电流变化

(a) 直线换向；(b) 延迟换向；(c) 超越换向

1.2.1 直线换向

$\sum e=0$ 时，$i_k=0$，$i=i_1$，换向元件中的电流按直线规律变化，如图 4.4-2 (a) 所示，这种换向称为直线换向。直线换向时，电流 i 在 $t=T_k/2$ 时改变方向，前、后刷边电流密度相等，换向元件的电流仅产生交轴磁动势。

1.2.2 延迟换向

$\sum e>0$ 时，$i=i_1+i_k$，$i_k>0$，电流 i 改变方向的时刻比直线换向的迟，如图 4.4-2 (b) 所示，这种换向称为延迟换向。延迟换向时，后刷边电流密度大于前刷边电流密度，换向元件中的电流所产生的磁动势有直轴分量，使发电机去磁、电动机增磁。

1.2.3 超越换向

$\sum e<0$ 时，$i=i_1+i_k$，$i_k<0$，电流 i 改变方向的时刻比直线换向的早，如图 4.4-2 (c) 所示，这种换向称为超越换向。超越换向时，前刷边电流密度大于后刷边电流密度，换向元件中的电流所产生的磁动势有直轴分量，使发电机增磁、电动机去磁。

换向火花与换向元件回路中的电磁变化过程有密切关系。通常，直线换向时电刷下不易出现火花；超越换向时前刷边可能出现火花；延迟换向时后刷边常出现火花。特别是当换向接近终了 ($t = T_k$) 时，由于电刷和与其即将脱离接触的换向片之间的接触电阻值 $RT_k/(T_k - t)$ 实际上并不趋于无穷大，换向元件中的电流还来不及变化到将要进入的支路所应有的电流 $-i_a$，回路中将留有如图 4.4-3 所示的剩余换向电流 i'_k。因而在换向元件回路断开时，尚需释放出相应的电磁能量，当 i'_k 较大，此能量达到一定限度时，将在后刷边出现火花。这一剩余换向电流是由电抗电动势造成的，应在设计及换向调整时予以补偿。

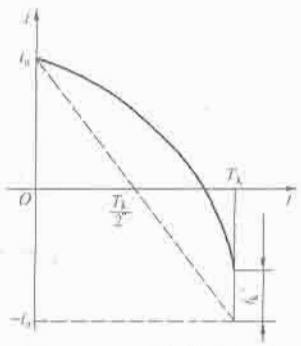


图 4.4-3 剩余换向电流

1.3 换向区

从槽内最先换向的元件边开始换向起，到最后换向的元件边换向结束止，该槽在电枢表面所转过的区域称为换向区，电枢绕组的元件在换向区内进行换向。换向区宽度 b_k 可按其定义和图 4.4-6 (a) 所示一个槽内 $2u$ 个元件边的换向时间错开情况，以及式 (4.4-1)、式 (4.4-2) 写出其计算式

$$b_k = [\beta_1 + (u-1) + \varepsilon_k] T_s v_h = \left[b_b + \left(u + \varepsilon_k - \frac{a}{p}\right) t_k\right] \frac{D_a}{D_k}$$

式中，D_a、D_k 为电枢、换向器直径；u 为每槽并列元件边数；ε_k 为绕组节距缩短或伸长的换向片数；v_h 为电枢圆周线速度。

若计及电刷的切向错位和电枢斜槽对换向区宽度的影响，则

$$b_k = \left[b_b + c_b + \left(u + \varepsilon_k - \frac{a}{p}\right) t_k\right] \frac{D_a}{D_k} + b_{sk} \tag{4.4-7}$$

式中，c_b 为电刷在换向器表面的切向错位量；b_{sk} 为电枢槽的斜距。

换向区应位于相邻主极之间的中性区域内，换向区宽度与中性区宽度的比值应不超过 1 (参见本篇第 7 章)。

1.4 片间电压

换向器上任意相邻两换向片之间的电压称为片间电压，其值与连接到换向片的电枢绕组元件所感生的电动势及绕组型式有关。不计绕组节距缩短和波绕组串联元件在各个极对下磁场位置相对位移的影响，片间电压为

$$U_{kx} = 2\frac{p}{a} l_a v_h N_s B_{\delta x} \tag{4.4-8}$$

式中，$B_{\delta x}$ 为与该二换向片相连元件所处位置的气隙磁通密度；l_a 为电枢铁心有效长度；N_s 为电枢绕组每元件匝数。

因而气隙磁通密度的分布曲线，在另一比例尺下即为换向器片间电压的分布曲线。

电机空载时，主极极靴范围内的气隙磁通密度 $B_{\delta x} = B_\delta$ 几乎不变。因此，空载时的最大片间电压为

$$U_{k0} = \frac{2pE_0}{\alpha_\delta K} \approx \frac{2pU}{\alpha_\delta K} \tag{4.4-9}$$

式中，E_0 为空载时电枢绕组的电动势；α_δ 为计算极弧系数；U 为电枢绕组的端电压；K 为换向片数。

负载时，交轴电枢反应使气隙磁场畸变，结果使某些换向片之间的片间电压升高。此时的最大片间电压为

$$U_{kmax} = U_{k0} K_d \tag{4.4-10}$$

$$K_d = \frac{B_{\delta max}}{B_\delta}$$

式中，K_d 为气隙磁场畸变系数；$B_{\delta max}$ 为负载时的最大气隙磁通密度。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

对于无补偿绕组电机，其 K_d 值约在 1.3～1.5 之间；对于有补偿绕组电机，其 K_d 值随补偿度而异，一般很小。气隙磁场畸变越大，最大片间电压越高，无补偿绕组电机弱磁运行时，其 U_{kmax} 最大。片间电压过高，将在换向片之间产生电位差火花，易于与电刷下的换向火花汇合，扩展成环火，造成严重后果。为防止电位差火花及环火，一般应使 $U_{kmax} \leqslant 40V$。

为简化计算，工程上通常只核算平均片间电压

$$U_{kav} = \frac{2pU}{K} \tag{4.4-11}$$

并按电机所属类型及运行特点，控制其平均片间电压不超过相应限值（参见本篇第 7 章）。

2 换向计算

2.1 数值计算

在换向过程中，电刷与换向片之间接触电压降的变化规律，特别是换向结束时接触电压降的值，与火花的形成及其强烈程度密切有关，是评估换向性能的重要物理量之一。列出换向元件回路的电压方程，对换向元件中的电流求解，推算出通过换向片与电刷之间接触层的电流，即可按接触电阻特性确定相应的接触电压降 u_b。

2.1.1 换向电路的电压方程及其求解

换向电路的电压方程与绕组型式、每槽并列元件边数 u、电刷覆盖片数 $\beta = b_b/t_k$ 及元件节距缩短或伸长的片数 ε_k 有关。

图 4.4-4 所示为 $u=3$、$\beta=2.5$、$\varepsilon_k=1.5$ 同槽式单叠短距绕组的换向电路。

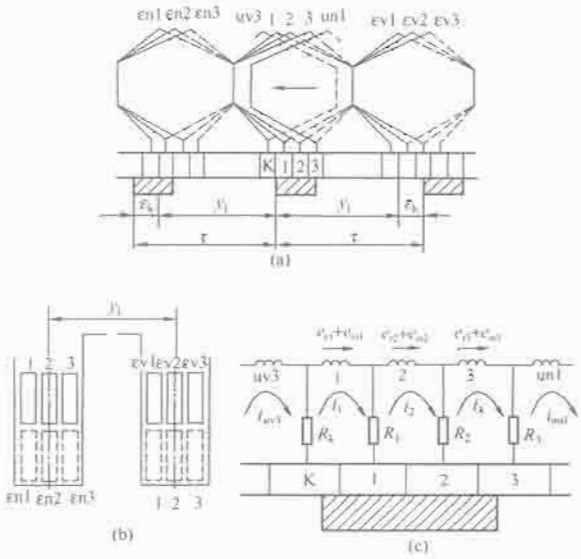


图 4.4-4 直流电机电枢绕组的换向电路
(a) 换向元件展示图；(b) 槽内元件边的布置；(c) 原理电路图

在不计元件和元件与换向片连接线电阻时其电压方程为

$$I_{\omega}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{bmatrix}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_1\\i_2\\i_3\end{bmatrix}+M_m\begin{bmatrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{bmatrix}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_{ev1}+i_{en1}\\i_{ev2}+i_{en2}\\i_{ev3}+i_{en3}\end{bmatrix}+$$

$$\begin{bmatrix}R_k+R_1&-R_1&0\\-R_1&R_1+R_2&-R_2\\0&-R_2&R_2+R_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_1\\i_2\\i_3\end{bmatrix}+$$

$$\begin{bmatrix}0&0&-R_k\\0&0&0\\-R_3&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{un1}\\0\\i_{uv3}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}e_{\omega1}\\e_{\omega2}\\e_{\omega3}\end{bmatrix} \tag{4.4-12}$$

或写成 $L\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\boldsymbol{M}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}_e+\boldsymbol{R}\boldsymbol{i}+\boldsymbol{R}_u\boldsymbol{i}_u=\boldsymbol{e}_\omega$ (4.4-13)

式（4.4-12）中，L_ω 为同槽并列元件 1、2、3 的自感或其彼此间的互感；M_m 为同槽任一上层元件边与任一下层元件边之间的互感；$e_{\omega j}$ 为元件 j 切割换向区内的外磁场所产生的旋转电动势；R_j 为换向片 j 与电刷之间的接触电阻。电流方程中，i_j（j=1、2、3）分别为元件 1、2、3 中的电流，是待求变量；元件 evj 和 enj 分别以时间间隔 $\varepsilon_k T_s$ 超前和滞后于元件 j 进行换向，元件 uvj 和 unj 分别以时间间隔 uT_s 超前和滞后于元件 j 进行换向，其中的电流可由 $i_j(t)$ 按下式推算

$$\left.\begin{aligned}i_{evj}(t)&=i_j(t+\varepsilon_k T_s)\\i_{enj}(t)&=i_j(t-\varepsilon_k T_s)\end{aligned}\right\} \tag{4.4-14}$$

$$\left.\begin{aligned}i_{uvj}(t)&=i_j(t+uT_s)\\i_{unj}(t)&=i_j(t-uT_s)\end{aligned}\right\} \tag{4.4-15}$$

因而，在已知换向区内气隙磁通密度分布的情况下，可将式（4.4-13）中的 $\boldsymbol{M}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}_e$ 和 $\boldsymbol{R}_u\boldsymbol{i}_u$ 项移至等号右端作为校正项，用龙格-库塔法对电压方程求解。求解时，变量初值可按直线换向的电流变化规律取值，作第 n 次迭代时，其右端校正项可由第 $n-1$ 次的迭代结果，按式（4.4-14）、式（4.4-15）所示的关系推算确定。当相邻两次迭代所得结果之差小于给定的某一小值时，迭代结束。

2.1.2 电刷接触电压降计算和换向性能预评估

由求解所得的 i_j（j=1、2、3），和由此推算所得的 i_{uv3} 和 i_{un1}，可得换向片 k、1、2 和 3 在不同时刻与电刷之间的接触电压降值

$$\left.\begin{aligned}u_{bk}(t)&=R_k(t)[i_{uv3}(t)-i_1(t)]\\u_{b1}(t)&=R_1(t)[i_1(t)-i_2(t)]\\u_{b2}(t)&=R_2(t)[i_2(t)-i_3(t)]\\u_{b3}(t)&=R_3(t)[i_3(t)-i_{un1}(t)]\end{aligned}\right\} \tag{4.4-16}$$

图 4.4-5 是图 4.4-4 所示直流电机当 $I_a=I_{aN}$，换向极气

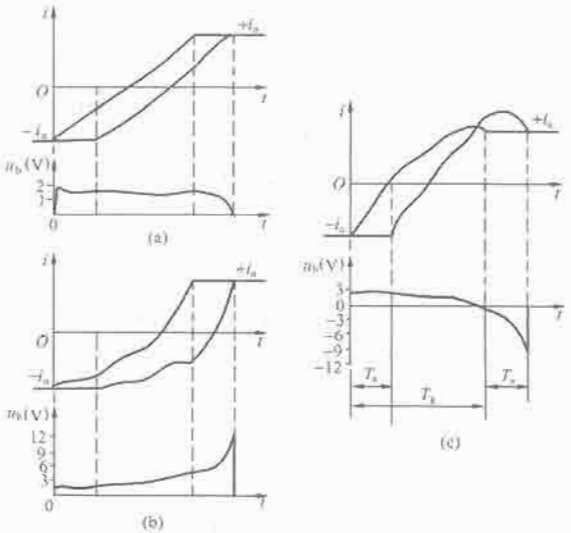


图 4.4-5 换向电流 i 和接触电压降 u_b 的变化情况
(a) $B_k=B_{kN}$；(b) $B_k=0.77B_{kN}$；(c) $B_k=1.23B_{kN}$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

隙磁通密度分别为 B_{kN}、$0.77B_{kN}$ 和 $1.23B_{kN}$ 时，在假定电刷与换向器之间为面接触，换向片与电刷间的接触电阻与接触面积成反比的条件下，按上法计算所得的换向元件电流 $i_1(t)$、$i_2(t)$ 及换向片 1 与电刷之间的接触电压降 $u_{b1}(t)$。

该图显示：当 $B_k=B_{kN}$ 时，换向元件电流的变化规律接近直线换向时的状态，电刷接触电压降变化不大；$B_k=0.77B_{kN}$ 时，附加换向电流使前刷边接触电压降降低，后刷边接触电压降显著增高，是为延迟换向；$B_k=1.23B_{kN}$ 时，换向过分超越，脱离接触时的接触电压降甚至反向，且具有相当大的值。换向片与电刷脱离接触时的接触电压降过大，是延迟换向和过分超越时，后刷边易于形成火花的原因之一。换向结束时，后刷边接触电压降绝对值的大小，是判断有否可能产生过分强烈火花的重要参量。

换向计算的准确性，在相当大程度上，取决于对影响电刷和换向器滑动接触特性诸多不定因素的掌握程度，而某些不定因素却往往又难以准确掌握。因而，上述计算结果只能作为设计阶段对换向性能的预评估。

2.2 工程计算

为简化换向计算，工程上并不先对换向元件中的电流求解，而是先给出最有利于换向的电流变化规律，即直线换向，计算直线换向条件下换向元件内的电抗电动势，据此确定为补偿电抗电动势所需的换向极气隙磁通密度，作为换向极设计的依据，待电机制成后再作换向调整，使所设计电机具有接近于直线换向的性能。

2.2.1 电抗电动势

直线换向时，若换向片与电刷间的接触电阻与接触面积成反比，则式（4.4-13）中的 $\boldsymbol{Ri}+\boldsymbol{R}_a\boldsymbol{i}_a=0$，换向电路的电压方程简化为

$$\boldsymbol{e}_r+\boldsymbol{e}_\omega=0 \tag{4.4-17}$$

式中，$\boldsymbol{e}_r$ 为同槽各并列元件的电抗电动势。

$$\boldsymbol{e}_r=\begin{bmatrix}e_{r1}\\e_{r2}\\e_{r3}\end{bmatrix}=-\left(L_\infty\begin{bmatrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{bmatrix}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_1\\i_2\\i_3\end{bmatrix}+M_m\begin{bmatrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{bmatrix}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_{ev1}+i_{en1}\\i_{ev2}+i_{en2}\\i_{ev3}+i_{en3}\end{bmatrix}\right) \tag{4.4-18}$$

式（4.4-18）表示，槽内某换向元件的电抗电动势为该元件的自感电动势，与所有同槽同层并列其他元件及所有同槽不同层其他元件边对该元件的互感电动势之和。

考虑到在直线换向条件下，各元件电流的时间变化率，在该元件换向时均为同一常值 $2i_a/T_k$，或在该元件未换向时为零；漏磁互感只存在于同时换向的同槽各元件之间，同槽各元件中，哪些元件在何时同时换向，可由图 4.4-6（a）所示各元件开始和结束换向的时间错开情况获知，即一个元件的换向周期为 $T_k=\beta_1T_s$，同槽并列元件依次相隔 T_s 开始或结束换向；同槽不同层元件边 εvj 和 εnj 以时间间隔 ε_kT_s 分别超前和滞后于元件 j 进行换向，因此，只要在该图中以并列各元件 j（$j=1$，2，3）和不同层各元件边 εvj、εnj（$j=1$，2，3）的换向周期 β_1 为宽，以 L_∞ 或 M_m 为高，分别绘出它们的电感矩形波，再在任一元件 j 的换向周期范围内，把各电感矩形波纵向高叠加，即得该元件 j 在其换向周期内的全电感 $L_{rj}(t)$（自感与所有同槽其他元件对它的互感之和），或电抗电动势 $e_{rj}(t)=-L_{rj}(t)(2i_a/T_k)$ 随时间而变的情况，如图 4.4-6（b）、图 4.4-6（c）、图 4.4-6（d）所示。

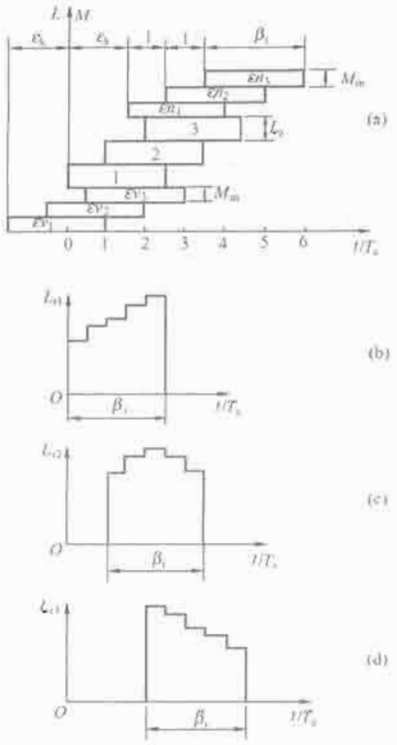


图 4.4-6 换向元件电抗电动势

由此可见，就某一换向元件而言，其 e_r 值在换向周期内一般不是常数，且同槽各换向元件的 $e_{rj}(t)$ 变化情况也各不相同，此外，电抗电动势 $e_{rj}(t)$ 和旋转电动势 $e_{\omega j}(t)$ 的波形也不一样。对此，工程上通常在平均的意义上实现式（4.4-17）所示的电动势平衡关系，使换向元件的平均电抗电动势与平均旋转电动势相互补偿，而在设计时尽量使二者的波形相接近，以提高其瞬时补偿度。所谓平均电抗电动势，是指在换向元件中的电流按直线规律变化情况下，同槽各个换向元件平均电抗电动势的平均值，其值可按下式计算

$$e_r=\frac{1}{u}\sum_{j=1}^{u}e_{r\omega j}=2N_a v_a l_a A\xi \tag{4.4-19}$$

式中，e_r 为平均电抗电动势；A 为电枢线负荷；ξ 为表征换向元件平均比漏磁导的平均值大小的系数（参见本篇第 7 章）。

系数 ξ 的值，与绕组元件的比漏磁导、每槽并列元件边数、元件节距缩短或伸长的换向片数以及电刷计算宽度与换向片距之比有关。减小槽形尺寸的高宽比和增加电刷的覆盖片数可使 ξ 的计算值减小。

2.2.2 旋转电动势

换向元件相对换向极气隙磁场旋转时所感生的旋转电动势，称为换向电动势，其平均值 e_k 可按下式计算

$$e_k=2N_a v_a l_{pk}B_k \tag{4.4-20}$$

式中，B_k 为换向极气隙磁通密度在换向区宽度内的平均值；l_{pk} 为换向极极靴长度。

对于换向极极靴长度 l_{pk} 小于电枢铁心长度 l_a 的电机，换向元件在（l_a-l_{pk}）范围内相对交轴电枢反应磁场旋转时所感生的旋转电动势，称为交轴电枢反应电动势 e_{aq}，其值可按下式计算

$$e_{aq}=2N_a v_a(l_a-l_{pk})B_{aq} \tag{4.4-21}$$

$$B_{aq}=\mu_0\frac{F_{aq}-F_\xi}{\delta_{aq}}=\mu_0\frac{1-\dfrac{A_c}{A}\alpha_\delta-\dfrac{2}{3}\dfrac{b_k}{\tau}}{1-\alpha_\delta}A \tag{4.4-22}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式中，e_{mj}为平均电枢反应电动势；B_{mj}为电枢绕组和补偿绕组的合成磁动势在换向区内（l_a-l_{pk}）处所建立的磁通密度平均值；A_c为补偿绕组线负荷；$F_c=A_c\tau\alpha_\delta/2$为补偿绕组在换向区内所建立的磁动势；$F_{mj}=A\tau\left[1-(2/3)\,b_k/\tau\right]/2$为换向区内交轴电枢反应磁动势的平均值，假定换向区内的电枢线负荷由$+A$按直线规律变至$-A$；$\delta_{mj}\approx\tau(1-\alpha_\delta)/2$为交轴电枢反应磁场磁力线所经空气部分的长度。

2.2.3 换向极气隙磁通密度的确定

确定换向极气隙磁通密度时，通常使换向具有略为超越的性质，以降低换向片与电刷在即将脱离接触时的接触电流密度，抑制后刷边的火花。

对于图4.4-7中被电刷所短接的n个串联换向元件，若忽略绕组元件、接线和电刷本身的电阻电压降，则可列出虚线所示回路的电压方程如下

$$\sum_{j=1}^{n}(e_{kj}-e_{mj}-e_{rj})=u_{b1}-u_{b2} \tag{4.4-23}$$

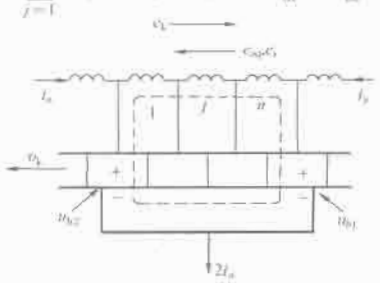


图4.4-7 换向极气隙磁通密度的确定

上式左边各项电动势若以各自的平均值表示，则可写成

$$n(e_k-e_{mj}-e_r)=\Delta U \tag{4.4-24}$$

式中，$n\approx\beta/m$为被电刷所短接的元件数，其中β为电刷覆盖片数，$m=a/p$为绕组的重路数；$\Delta U=u_{b1}-u_{b2}$为前后刷边接触电压降之差。

将式（4.4-19）~式（4.4-21）代入式（4.4-24），可得为补偿交轴电枢反应电动势和电抗电动势所需的换向极气隙磁通密度

$$B_k=\left(1+\frac{a\Delta U}{\beta pe_r}\right)A\xi\frac{l_a}{l_{pk}}+B_{mj}\left(\frac{l_a}{l_{pk}}-1\right) \tag{4.4-25}$$

直线换向时，$u_{b1}=u_{b2}$，$\Delta U=0$。为了获得超越换向，可取$\Delta U>0$，使B_k较直线换向时为强。经验表明，使用石墨电刷时，取$\Delta U=0.75$V；使用铜石墨电刷时，取$\Delta U=0.25$V可获得较为满意的效果。

3 改善换向的方法

换向元件中由合成电动势Σe所产生的附加换向电流i_k是引起电刷火花的主要原因。减小Σe和增加换向元件回路内的电阻值，是限制i_k、从而改善换向的有效方法。

3.1 移刷

在无换向极电机中，可借电刷移位，使换向区随电刷自几何中性线移至某一极性气隙磁场内适当的位置，利用该处气隙磁场在换向元件中产生的旋转电动势，来抵偿电抗电动势，从而达到改善换向的目的，如图4.4-8所示。

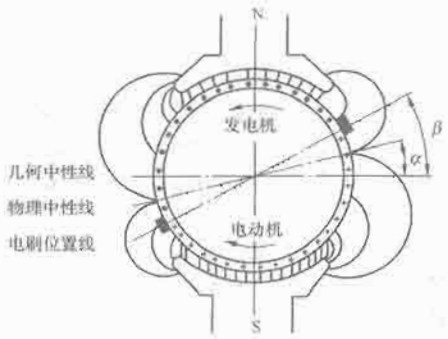


图4.4-8 移刷

由图可见，发电机应顺转向移刷，电动机应逆转向移刷，且电刷偏离几何中性线的角度β，应大于物理中性线的偏移角α。采用移刷改善换向时，换向区内的气隙磁场将随电枢电流的增加而减弱，某一刷位只能在某一特定负载的情况下才能获得较好的换向。因此这种方法只适用于换向不困难的小型不逆转直流电机。

3.2 换向极

装置换向极是广泛采用的改善直流电机换向的有效措施。换向极装在主极之间的交轴上，与主极成90°电角度，极数一般与主极极数相同。在发电机中，换向极的极性应与沿旋转方向前面即将进入的主极的极性相同。在电动机中则相反。

换向极的作用在于抵消交轴电枢反应磁动势，并在换向区内建立与交轴电枢反应磁动势方向相反、磁通密度为B_k的换向极磁场，使换向元件旋转时能产生换向电动势e_k（见表4.4-1），以抵消电抗电动势e_r，并形成适当的超越换向，如图4.4-9所示。

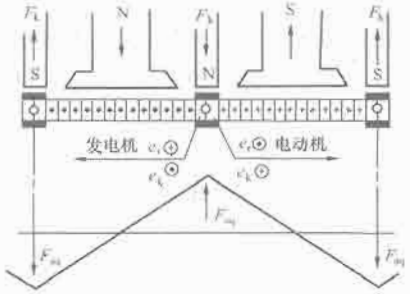


图4.4-9 换向极的极性与换向电动势的方向

对于无补偿绕组电机，换向极绕组磁动势为

$$F_k=F_{mj}+F_{k0} \tag{4.4-26}$$

式中，F_{mj}为交轴电枢反应磁动势；F_{k0}为换向极磁路磁位降，在换向极磁路未饱和时，主要是B_k所引起的气隙磁位降。

若换向极的极靴长度l_{pk}等于电枢铁心长度l_a，则$B_k=\xi A$时，$e_k=e_r$，为直线换向；$B_k>\xi A$时$e_k>e_r$，为超越换向；$B_k<\xi A$时，$e_k<e_r$，为延迟换向。在换向极磁动势已确定的情况下，可以通过调整换向极气隙以获得所必需的B_k，从而调整换向性能。

为保持B_k与电枢线负荷A在不同负载时都成正比，换向极磁动势的大小应与电枢电流成正比，同时换向极磁路应处于低饱和状态。因此，换向极绕组必须和电枢绕组串联，换向极气隙应较大，换向极磁路磁通密度应较低，以提高磁路的线性度。

但随着负载电流的增大，即使采用了较大的气隙，换向极磁路仍将逐渐趋于饱和，B_k的增长将逐渐缓慢，当负载电流超过一定限度，磁路过度饱和后，B_k反将逐渐变小，如图4.4-10所示，此时e_k将不足以补偿e_r，而呈现延迟换向。比换向极气隙磁通大得多的换向极漏磁通Φ_{1k}是造成换向极磁路饱和的重要因素。采用换向极第二气隙δ_{k2}（换向

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

极第二气隙是在换向极极身与机座之间垫非磁性垫片而形成的）可以增加漏磁磁路磁阻，减小换向极漏磁，从而改善电机过载时的换向性能，如图 4.4-11 所示。

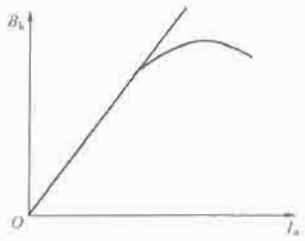


图 4.4-10 换向极气隙磁通密度与电流的关系

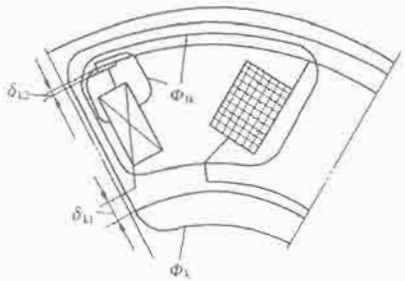


图 4.4-11 换向极第二气隙

装置换向极只能在换向周期内使 e_k 和 e_r 的平均值相抵消，而不能使它们在换向周期内任一瞬间均相互抵消，这是因为 e_k 和 e_r 瞬时值随时间而变化的波形不同，前者决定于 B_k 在换向区内的空间分布，后者则与电枢绕组型式、电刷覆盖片数及换向元件中电流的变化规律等因素有关。电抗电动势的平均值 e_r 越大，e_k 和 e_r 的瞬时值之差也越大。因此，改善换向除了应使 e_k 与 e_r 的波形尽量接近，以获得较好的瞬时补偿度之外，还应对 e_r 的值加以限制。一般 e_r 应小于 5～8V，冲击负载时应小于 8～14V，高圆周速度时应取低值。

3.3 补偿绕组

补偿绕组分布于主极极靴的补偿槽内，与电枢绕组串联，其中通以与同一主极下电枢绕组电流方向相反的电流，且其线负荷与电枢线负荷相接近，因而它所建立的磁动势与电枢磁动势方向相反，在主极极靴范围内两者的大小也接近，如图 4.4-12 所示。补偿绕组的作用在于补偿电枢磁动势，从而基本消除电枢反应所引起的气隙磁场畸变，使片间的最大峰值电压降低，以减小产生换向器电位差火花的可能性。

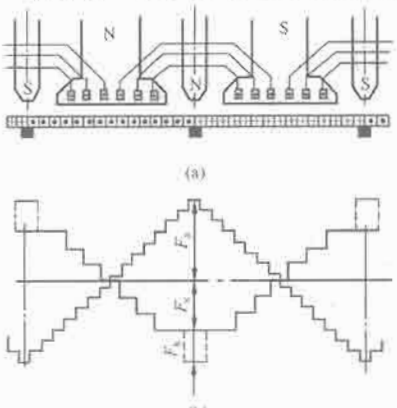


图 4.4-12 补偿绕组

(a) 补偿绕组布置；(b) 补偿绕组磁动势

采用补偿绕组的电机毫无例外地都装有换向极。由于补偿绕组与换向极绕组同轴，两者在交轴所建立的磁动势方向相同，因此，采用补偿绕组后换向极绕组磁动势为

$$F_k = F_{aq} - F_c + F_{k0} \tag{4.4-27}$$

式中，F_c 为补偿绕组磁动势。

比较式（4.4-27）与式（4.4-26）可见，采用补偿绕组后可减小换向极所需的安匝数，从而可使换向极的漏磁通减小，提高换向极磁路的线性度，以改善电机过载和承受冲击负载时的换向性能。

3.4 电刷与滑动接触

选用电阻率高、接触电压降较大，特别是伏安特性较陡的电刷，可抑制换向元件回路内因电抗电动势与换向电动势未能瞬时补偿所引起的附加换向电流，有效地改善换向。换向器表面的薄膜——换向器氧化膜，对换向也很有影响。

电机正常运行时，换向器表面将形成一层厚度适当的薄膜，它是由氧化亚铜以及吸附的石墨屑和水分等所组成。这层薄膜能增大换向元件回路的接触电阻，薄膜中的石墨屑与水分还能对滑动接触起润滑作用，以保持良好而稳定的滑动接触，对换向有利。薄膜在电机运行中不断地被电刷的研磨作用所破坏，同时当电流通过滑动接触层时，由于滑动接触面的温度较高，接触层中含有氧气和水分，正电刷又不断分离出石墨屑和碳的结晶体，所以又不断形成新的薄膜。当这种破坏和重新形成处于平衡时，薄膜便达到稳定的正常运行状态。如果滑动接触面温度过低或周围环境存在缺氧、干燥等情况，薄膜被破坏后就不易重新生成，将引起电刷振动，噪声增大，同时换向变坏，产生火花。在相反的情况下，薄膜生成过厚而厚薄不均，容易引起刷杆上电刷间电流分配不均，而使火花集中到某几个电刷上。

电机运行时因机械原因所引起的滑动接触不良也会导致电刷火花的产生。选用合适的刷握结构和与之相配的电刷形状可消除或预防这类火花的出现。因此，在电刷宽度大的大型电机中，多采用分瓣电刷，并用各自独立的压指加压，以提高电刷对换向器表面的跟随性；电刷上端面的倾斜角应与刷握结构相适应，以确保适当的电刷压力；在电刷顶部加装带有弹性（例如橡胶、塑料）的减振垫以吸收振动等都是改善滑动接触的有效措施。

电刷与滑动接触状态对换向的影响因素很多，关系复杂，因而在选择电刷时应综合考虑电机的特点、运行状态、使用场所环境以及电刷的各项特性等因素，结合实践经验来选择，参见本篇第 7 章。

3.5 叠片机座与电感分路

当电机负载突变时，在换向极磁路中的机座、换向极铁心以及换向极垫片等零部件内将产生涡流。涡流的阻尼作用将使换向极磁通的变化滞后于电枢负载电流的变化，从而造成在负载突加或突卸时，分别出现换向过分延迟或过分超越，使电机换向性能较稳态时恶化。机座、换向极铁心为整体结构时，情况更为严重。为改善突变负载时的换向性能，可采取如下措施：

1）机座与换向极铁心采用叠片结构，换向极垫片应开槽或采用高电阻材料冲制，以减少其中有害的涡流阻尼作用。

2）采用与换向极绕组并联的电感分路，如图 4.4-13 所示。电感分路的时间常数应较换向极绕组的大，在电枢电流急剧变化时，可以使换向极绕组的电流 I_k 和换向极磁通 Φ_k

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

有更快速的变化。

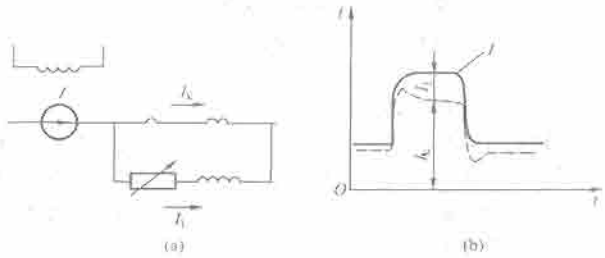


图 4.4-13 换向极绕组的电感分路
(a) 接线图；(b) 负载突变时的电流变化

3.6 其他

除以上各项改善换向的措施外，设计电机时应设法降低电枢槽的槽深与槽宽之比（如取消槽楔代之以无纬带绑扎，采用变断面电枢绕组），增加电刷覆盖片数（刷杆上半数电刷在换向器上做切向错位），采用短距、异槽式或拉图尔式电枢绕组（参见本篇第5章）等，都是行之有效的改善换向的措施。它们或者可降低平均电抗电动势 e_r，使电抗电动势波形平坦，易于获得较好的瞬时补偿度；或者可使任一元件在换向时均存在同槽短路元件，后者既可对槽漏磁进行阻尼，使换向元件漏磁电感减小，又可吸收换向元件回路断开时，因存在剩余换向电流所必须释放的电磁能量，有利于抑制电刷火花。

4 换向火花

良好的换向是直流电机正常运行的必要条件。换向不良时，会在电刷下出现火花。微弱的火花对电机的正常运行并无妨碍，还有助于生成适当的换向器氧化膜，但当火花超过一定级别时，将引起换向器和电刷的电腐蚀和机械磨损，从而使电机不能正常运行，严重时可使电机损坏。

4.1 火花等级

按火花的强烈程度及其对换向器和电刷所造成的后果，换向火花分为 1，$1\frac{1}{4}$，$1\frac{1}{2}$，2 和 3 等五级（见GB 755《旋转电机 定额与性能》）。如无特殊要求，电机在从空载到额定负载的情况下，火花应不超过 $1\frac{1}{2}$ 级；短时过载时，火花应不超过 2 级。

4.2 火花评定

迄今，换向火花等级仍由有经验人员用肉眼观察评定。为避免肉眼观察的主观性，曾试图发展客观评定火花等级的新方法，但都尚未达到实用阶段，这些方法有：

1）光谱分析。根据火花发光光谱中各谱线的波长（即颜色）及其相对强度，来判别火花的等级。采用此法进行判别时，需考虑电刷牌号、刷握压力和换向器表面温度不同时，其火花光谱的差异。

2）高通滤波。在正负刷杆间接高通滤波器将直流电压隔开，滤去电枢电动势中的低频脉动分量，根据通过滤波器的高频火花电压来判别火花的等级。采用此法时，对高通滤波器有较高的设计要求。

3）光电测量。用光电元件将火花发出的光能转变为电信号，根据该电信号的大小来判别火花的等级。测量时必须遮蔽其他光源。

4）无线电磁波测试。根据换向火花向空间所发射的电磁波的强弱来判别火花等级。此法易受外界电磁场的干扰。

4.3 无火花换向区

无火花换向区（简称无火花区）是指电机在规定负载范围内，能保持无火花换向所允许的换向极磁场强度变化范围。无火花区通过试验求得，试验时用其他直流电源在换向极绕组中附加正向和反向励磁电流，对应于不同负载电流，求出电刷下火花发生或熄灭时所附加的上、下限电流值，用负载电流为横坐标、附加电流为纵坐标作图，连接对应于各负载电流的上限附加电流各点成一曲线，再连接对应于各负载电流的下限附加电流各点成另一曲线，两曲线所包络的区域即为无火花区，如图 4.4-14 所示。

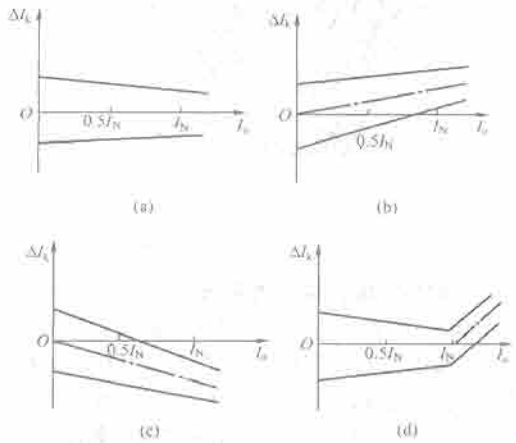


图 4.4-14 无火花区
(a) 换向极合适；(b) 换向极偏弱；(c) 换向极偏强；(d) 换向极磁路饱和

无火花区中相应于某电枢电流的上、下限附加电流之差，为电机在该负载情况下的无火花区宽度。不同负载时各宽度中点的连线，为无火花区的中心线。无火花区的宽窄及其中心线的走向是衡量电机换向能力和换向极磁场强弱的标志，也是分析电机换向性能和进行换向调整的根据。

由于换向元件中的 e_k 与 e_r 很难在任一瞬间相互完全抵消，无火花区的宽度一般将随负载的增加而变窄，直至最终消失。

无火花区在空载至过载的范围内，都具有足够的宽度，且其中心线与横坐标基本重合［见图 4.4-14 (a)］，表示电机有较强的换向能力。中心线偏离横坐标上翘或下垂［见图 4.4-14 (b)、(c)］，表示换向极磁场偏弱或偏强，此时可改变换向极绕组的匝数或换向极气隙进行换向调整。若在电枢电流超过某值后无火花区中心线突然上翘［见图 4.4-14 (d)］，则多半是换向极磁路饱和所致，这种现象往往出现在无补偿绕组的电机中。无火花区的其他异常现象，如无火花区过早闭合，空载点正、负附加电流不对称，无火花区中心线弯曲，乃至上限或下限曲线两次通过横坐标轴等，一般与电刷跳动、接线错误或存在内部故障、电刷不在几何中性线上，以及补偿作用不良等种种原因有关，可根据不同情况做出判断，采取相应措施。

由于主极磁场对换向的影响，换向元件有效电阻和电抗又随转速而变化等因素，调速电机低速和高速时的无火花区因此发生很大偏移，从而增加了换向调整的难度，所以调速范围宽的电动机容易发生换向困难。在这种情况下，考虑到高速时的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

无火花区宽度总是小于基速时的宽度，且闭合较早，偏移时容易使额定点移出区外，因此，以高速无火花区调至基本对称为基础，让基速无火花换向区向第一象限偏移，较之以基速无火花换向区基本对称为基础，让高速无火花区向第四象限偏移，更易于取得高低速换向性能之间的平衡协调。

5 环火

电机在某些恶劣的负载条件下运行时，正、负极性电刷之间可能形成一股强烈的环形电弧，同时伴有闪光与巨响，这种现象称为环火。环火相当于电枢绕组通过电刷直接短路，具有很大的破坏性，它会灼伤换向器表面与电刷，甚至烧坏电枢绕组。电弧还可能由换向器表面飞越到换向器前压圈、机壳而造成电机接地，其强烈闪光也会伤害运行人员。

5.1 产生环火的原因

当电机承受剧烈的冲击负载或发生突然短路故障时，换向极磁路饱和加上在暂态过程中的涡流阻尼效应，将使换向处于严重延迟状态，后刷边可能出现电弧，加上换向器的旋转和电动力的作用，电弧被机械地拉长，如图 4.4-15（a）所示。当电弧被拉长到一定的长度 l_g 达某换向片 K 时，若该换向片与电刷间的电位差 U_k 小于为维持该长度电弧不熄灭所必需的电弧电压 U_g，则电弧将自行熄灭。但若一次熄弧后，由于附近空气已被电离，接着产生的电弧将更为强烈，为维持该长度电弧不熄所需的电弧电压值也将随之降低，从而使电弧有继续被拉长的可能。另一方面，电枢电流的急剧增加使气隙磁场畸变更为严重，换向器片间电压的最大值也将显著增大。此时，若片间积有炭粉和金属粉末，将在某些换向片间产生电位差火花或小电弧放电，如图 4.4-15（b）所示。由于电弧放电使周围空气电离，可能使已经通过最大片间电压区的小电弧维持不熄灭。若电弧扩展所及的两换向片 N 和 K 之间的电位差 U_{nk} 足以维持电弧不熄灭，则它有可能继续扩展，并与其后续形成的小电弧进一步扩展成长弧。这样，在一定条件下，电刷火花与电位差火花可能汇合在一起，发展成一股跨越正、负极性电刷之间的电弧，形成环火。

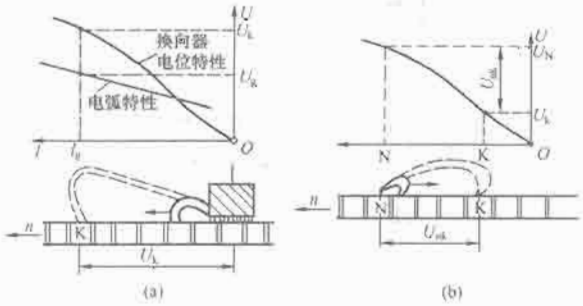


图 4.4-15 环火的形成

（a）电刷火花的扩展；（b）电位差火花的扩展

产生环火的原因及其形成过程比较复杂。在某些情况下，即使负载稳定，换向良好，仅由于片间电压过高也可能形成环火，甚至在空载情况下，由于换向器表面不干净，换向片边缘存在毛刺或倒角不良引起尖端放电而出现环火。

5.2 防止环火的措施

1）装置补偿绕组。利用补偿绕组对电枢磁动势进行补偿，以消除气隙磁场的过度畸变，从而使片间电压的最大值降低，减少产生电位差火花的可能性，有利于抑制电位差火花和电刷火花的扩展。

2）采用偏心主极气隙。主极气隙由主极中心线向两侧逐渐增大，使电枢磁动势较大处相应具有较大的气隙，可降低由电枢反应所引起的气隙磁场畸变程度，使片间电压的最大值减小。

3）设置隔弧装置。在不同极性刷杆之间，装置由耐弧材料所制成的绝缘隔板，如图 4.4-16 所示，可机械性地限制电弧的扩展。此外，增大换向器对地绝缘距离，在换向器外侧装设绝缘隔板以防止对地产生电弧，也能减轻环火造成的后果。



图 4.4-16 隔弧装置

4）采用快速断路器。当电机的电流达到危险值时，用快速断路器切断外电路。如快速断路器能在电弧扩展到相邻电刷之前断开，可起防止环火的作用，即使在环火发生后断开，也能减小电机的损坏程度。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第5章 电枢绕组

1 电枢绕组的构成和参数

1.1 绕组构成

直流电机电枢绕组由若干绕组元件组成，元件一般安放在电枢槽内，并以一定规律与换向片接成闭合回路。由元件组成的闭合回路，通过换向器被正、负电刷截分成若干并联支路，再由电刷与外电路相连。每一支路各元件的对应边，一般均应处于相同极性的磁场下，以获得最大的支路电动势和电磁转矩。每个电枢绕组元件的匝数 $N_s \geqslant 1$，即元件可以有单匝、多匝或分数匝，如图 4.5-1 所示。元件的两条边分别置于不同槽的上、下层内。通常，槽内每层并列的元件边数 $u=1\sim5$。当 $u>1$ 时，可以布置成同槽式或异槽式绕组，如图 4.5-2 所示。电枢元件总数 S 为电枢槽数 Q 和 u 的乘积，一般与换向片数 K 相等，即 $S=K=Qu$。绕组总导体数 $Z=2SN_s$。有些绕组还需要连接绕组内等电位点的均压线。

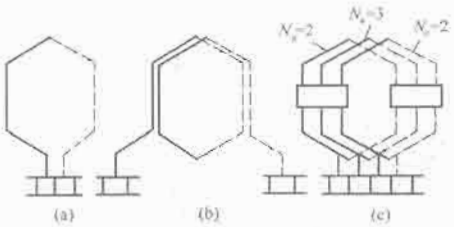


图 4.5-1 单匝和多匝元件
(a) $N_s=1$；(b) $N_s>1$（整数）；
(c) $N_s=7/3$（分数）

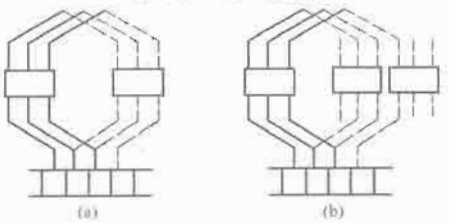


图 4.5-2 元件上、下层边的布置方式
(a) 同槽式；(b) 异槽式

1.2 绕组参数

绕组元件在槽内的安放位置及其与换向片间的连接规律，由下列绕组节距和参数确定：

1）槽节距 Y_s。一个元件的两个边在电枢圆周上用槽数表示的跨距。Y_s 值应等于或接近于一个极距内的槽数，即

$$Y_s = \frac{Q}{2p} \mp \varepsilon_s \qquad (4.5\text{-}1)$$

式中，$\varepsilon_s \leqslant 1$ 为以槽数表示的短距数。$\varepsilon_s=0$ 时，为整距绕组；ε_s 前取“－”时，为短距绕组；取“＋”时，为长距绕组。整距绕组的感应电动势和电磁转矩最大，但换向性能稍差。短距或长距绕组对换向有利，通常采用短距绕组，以缩短元件的端接线。

2）第一节距 Y_1。一个元件的两个边在电枢圆周上用换向片数表示的跨距，也称为后节距，即

$$Y_1 = \frac{K}{2p} \mp \varepsilon_k = u\left(\frac{Q}{2p} \mp \varepsilon_s\right) \qquad (4.5\text{-}2)$$

式中，ε_k 为以换向片数表示的短距数。

3）第二节距 Y_2。接在同一换向片上的两个元件边，在电枢圆周上用换向片数表示的跨距，也称为前节距。

4）换向器节距 Y_k。一个元件的两个出线端在换向器上用换向片数表示的跨距。

5）合成节距 Y。两个相邻串联元件的对应边在电枢圆周上用换向片数表示的跨距，其值等于 Y_k。

6）均压线节距 Y_{eq}。需接均压线的绕组内相邻等电位点在电枢圆周上用换向片数表示的跨距。

7）重路数 m。绕组的并联支路数对相应单重绕组并联支路数的倍数。

8）闭路数 t。所有绕组元件与换向片连接后所形成的闭合回路数。t 为换向片数 K 与 Y_k 的最大公约数。

不同类型绕组的节距如图 4.5-3 所示。

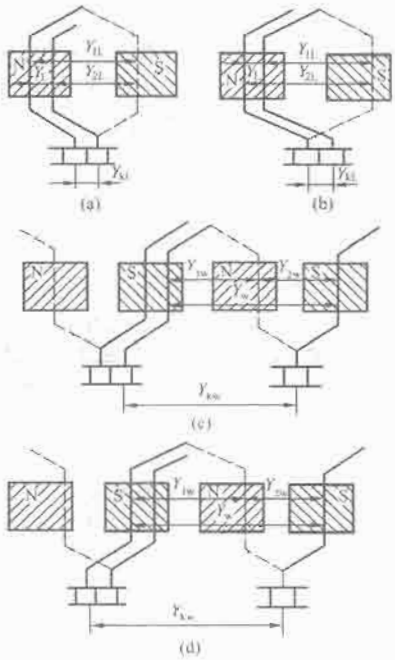


图 4.5-3 不同类型绕组的节距
(a) 叠绕开口（前进）；(b) 叠绕交叉（后退）；
(c) 波绕开口（后退）；(d) 波绕交叉（前进）

2 绕组的对称条件

在磁场对称分布和电刷接触良好的情况下，为使电机空载时绕组内部无环流，负载时各并联支路电流均匀分配，绕组各对支路的元件数应相等，其对应元件或元件边应处于相同的磁场位置，以便在电机运行时，绕组各并联支路具有相同的电动势和电阻。符合上述要求的绕组称为对称绕组，应该满足下列对称条件

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$\begin{aligned} u &= \text{整数} \\ Q/a &= \text{整数} \\ p/a &= \text{整数} \end{aligned} \tag{4.5-3}$$

这些条件合称为第一种对称条件（完全对称条件）。如果不能满足，可退而满足下列第二种对称条件（不完全对称条件）

$$\begin{aligned} u &= \text{整数} \\ Q/a &= \text{整数} \\ 2p/a &= \text{整数} \end{aligned} \tag{4.5-4}$$

3 常规电枢绕组

直流电机的常规电枢绕组有同槽式叠绕组、波绕组和蛙绕组三类。

3.1 叠绕组

叠绕组也称并联绕组。组成一条支路的各串联元件的对应边，处于同一主极下，元件前后相叠、槽内元件边按双层布置。

按重路数 m，叠绕组可分为单叠和复（多重）叠绕组：

1）单叠绕组并联支路对数 $a=p$，需要连接支路内等电位点的甲种均压线。适用于各种容量、正常电压和转速的直流电机。

2）复叠绕组并联支路对数 $a=mp$，可以连接成单闭路或 t 闭路，除甲种均压线外还要接乙种或丙种均压线。适用于大型极限容量直流电机，或中型低电压大电流直流电机。

众所周知，直流电机一个电枢上的功率为

$$P=\frac{\pi a D_a}{2pN_a}U_{kav}A$$

式中，N_a 为每个绕组元件的匝数，极限容量电机时 $N_a=1$；D_a 为电枢直径；A 为电枢线负荷，受换向和发热限制；U_{kav} 为平均片间电压，即使是有补偿绕组电机，也不能超过 16～22V。

可见，在规定电枢直径的情况下，采用复叠绕组并保持其他条件不变，使并联支路数增加 m 倍，功率大致可提高 m 倍，从而提高电机的极限容量。对于大功率正逆转电动机，在规定功率的情况下，采用复叠绕组保持并其他条件不变，可以缩小电枢直径，降低转动惯量。

为了各重路的元件在电枢槽内能正确地交替排列，多重（叠或波）绕组必须：

1）两个极距内的槽数 $2q$ 严格遵守 $2q=mk\pm1$ 的规定（k 是整数）。

双重绕组，应使 $2q=2k_1\pm1$（k_1 是整数），而每极槽数 $q=k_1\pm0.5$；三重绕组，应使 $2q=3k_2\pm1$，即 q 不是 3 的倍数，或 $q=k_3+0.5$（k_2、k_3 都是整数）。三重以上叠绕组尚未见采用。

2）槽内每层并列的元件边数 u 应不是重路数 m 的倍数，且 $u\leqslant5$。

3）以槽数表示的绕组第一节距 Y_1 对绕组所有元件应该相同。

对于 K/p 等于偶数的双叠绕组，除甲种均压线外，因两重路的等电位点在电枢铁心两侧，还要用穿过铁心的均压线，尽管其换向性能优于 K/p 等于奇数的双叠绕组，却很少采用。

复叠绕组只满足第二种对称条件，重路间存在不对称电动势，应选用较大的每对极槽数 $2q$，并仔细选择第一节距，以改善电机的换向性能和运行稳定性。

实践证明复叠绕组的换向性能不够稳定，不得不用单叠绕组代替复叠绕组。为此，有些电机采取提高电枢线负荷 A；采用变断面电枢线圈并减薄绝缘厚度、用无纬带绑扎代替槽楔，以缩小电枢槽高度；电枢整浸等措施，来解决因提高 A 和 J_a 后引起的换向和温升问题。

3.2 波绕组

波绕组也称串联绕组。组成一条支路的各串联元件的对应边，处于所有相同极性的主极下，元件展开呈波浪形，槽内元件边按双层布置。波绕组也可按重路数分为单波和复波绕组：

1）单波绕组并联支路对数 $a=m=1$，不需要均压线，适用于中等功率以下的直流电机。

2）复波绕组并联支路对数 $a=m$，$1<m<p$，并联支路数介于单波绕组和单叠绕组之间，可以连接成单闭路或 t 闭路，要接乙种或丙种均压线。适用于中、大型多极低速直流电动机，如轧钢或矿井卷扬电动机。

复波绕组的 $2q$、u 和第一节距的选择，与复叠绕组相同。

复波绕组可满足第一种对称条件，并联支路数远少于复叠绕组，而且复波绕组电机一般转速较低，有较好的换向性能和运行稳定性。若因受空间限制而采用非全额均压线时，每槽至少应接一根，并注意沿圆周的均匀分布，以避免因均压线沿圆周分布不均产生的换向问题。

常规电枢绕组的主要特点见表 4.5-1，设计、计算参见本篇第 7 章和第 8 章。

表 4.5-1 常规电枢绕组的主要特点

绕组型式		叠绕组		波绕组		蛙绕组	
		单	复	单	复	单	复
重路数 m		$m_L=1$	$m_L>1$	$m_w=1$	$1<m_w<p$	$m_L=1$	$m_L>1$
						$m_w=pm_L$	
支路对数 a		$a=pm_L$		$a=m_w$		$a=pm_L+m_w=2pm_L$	
绕组节距	Y_s	$Y_s=Q/(2p)\mp\varepsilon_s$				$Y_{sL}=Q/(2p)\mp\varepsilon_s$，$Y_{sw}=Q/(2p)\pm\varepsilon_s$	
	Y_1	$Y_1=K/(2p)\mp\varepsilon_k$				$Y_{1L}=K/(2p)\mp\varepsilon_k$，$Y_{1w}=K/(2p)\pm\varepsilon_k$	
	Y_k①	$Y_k=\pm m_L$		$Y_k=(K\mp m_w)/p$②		$Y_{kL}=\pm m_L$，$Y_{kw}=K/p\mp m_L$	
	Y	$Y=Y_k$					
	Y_2	$Y_2=Y_1-Y_k=Y_1\mp m_L$		$Y_2=Y_k-Y_1$		$Y_{2L}=Y_{1L}-Y_{kL}=Y_1\mp m_L$ $Y_{2w}=Y_{kw}-Y_{1w}=Y_{2L}$	

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

绕组型式	叠绕组		波绕组		蛙绕组	
	单	复	单	复	单	复
闭路数 t	$t=1$	t 为 K 与 Y_k 的最大公约数	$t=1$	t 为 K 与 Y_k 的最大公约数	$t_L=1$ t_w 为 K 与 Y_{kw} 的最大公约数	t_L 或 t_w 分别为 K 与 Y_{kl} 或 Y_{kw} 的最大公约数
电刷宽度 b_b	$b_b>(m_L+1)t_k$		$b_b>(m_w+1)t_k$		$b_b>(m_L+1)t_k$	
刷杆数 N_b	$N_b=2p$		$2\leqslant N_b=2p$	$N_b=2p$	$N_b=2p$	
均压线	甲种	甲种加乙或丙种	不需要	乙或丙种	不需要	
应用范围	适用于正常电压和转速的各种电机	适用于大中型低电压大电流电机	适用于小容量高电压或低转速电机	适用于大中型多极高压或低转速电机	应用范围与单叠绕组相同，不必另接均压线	应用范围与复叠绕组相同，不必另接均压线

注 下角标 L 代表叠绕组，w 代表波绕组。

① 公式中取"+"时，叠绕组为开口绕组，波绕组为交叉绕组；取"−"时，叠绕组为交叉绕组，波绕组为开口绕组。主极极性和转向相同时，在开口与交叉两种绕组的不同情况下，各相应刷杆的极性相反。改变接法，由交叉改为开口或开口改为交叉，可改变复绕组的闭路数。

② 对于 p 为偶数的单波绕组，K 必须是奇数，即 Q 和 u 都应是奇数。但有时 u 仍可取偶数，则应取 $K=Qu-1=S-1$，并使一个元件不与换向器连接。不与换向器连接的元件称为伪元件或死线圈。

3.3 蛙绕组

单(或复)蛙绕组由单(或复)叠绕组与复波绕组组成。蛙绕组的基本绕组是叠绕组，波、叠绕组互起均压作用，不需另接均压线，结构较简单，换向性能相对较好，它的并联支路对数 $a=2pm_L$，适用范围与叠绕组相同，见表 4.5-1。常规蛙绕组的元件边，在槽内一般为四层布置，由上而下第一和第四层为波绕组，第二和第三层为叠绕组。

4 特殊电枢绕组

为了适应和提高中大型直流电机的运行、换向性能和极限容量的要求，常采用诸如异槽式、拉图尔式等特殊电枢绕组。

常用特殊电枢绕组的构成和特点见表 4.5-2。它们在电枢上的连接，如图 4.5-4 所示。

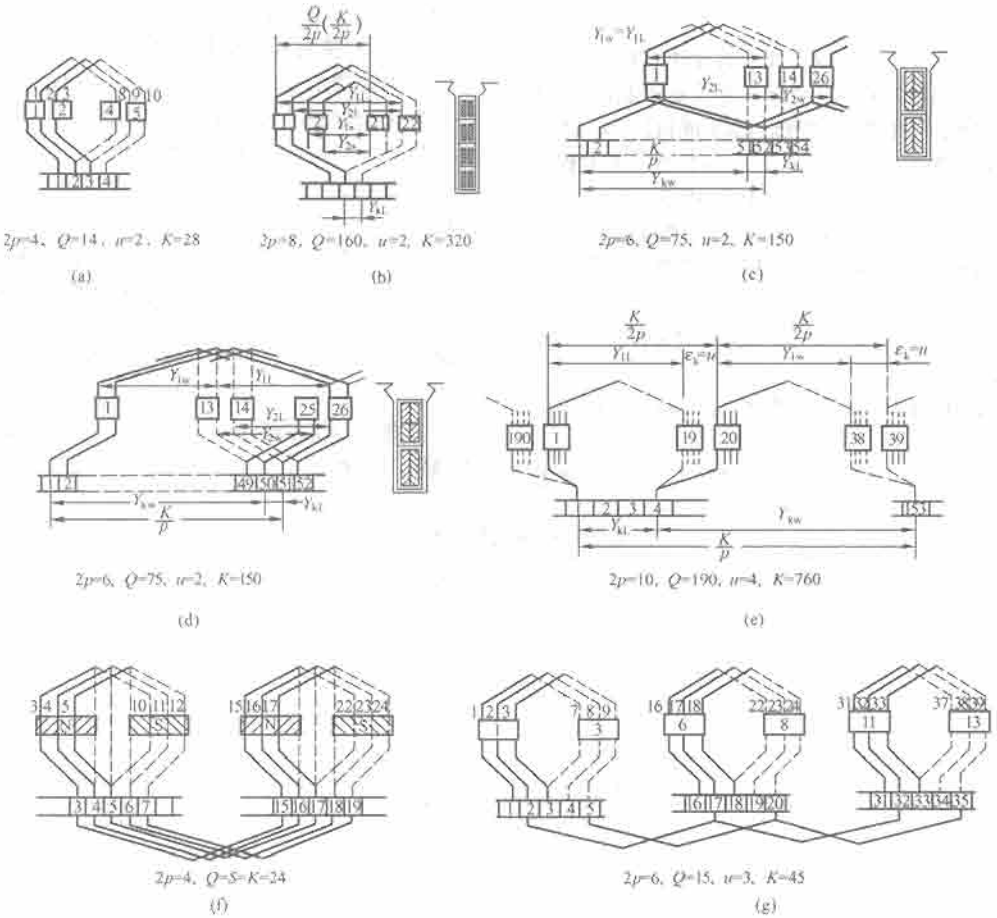


图 4.5-4 常用各类特殊绕组的元件在电枢上的连接

(a)异槽式叠绕组；(b)拉图尔叠绕组；(c)甲种异槽式蛙绕组；(d)乙种异槽式蛙绕组；(e)拉图尔蛙绕组；(f)对称双叠绕组；(g)不对称双叠绕组

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 4.5-2 常用各类特殊电枢绕组的构成和特点

类型		绕组节距	构成与特点		适用范围
异槽式叠绕组		$Y_k=b\pm c/u$ 式中，$b\approx Q/(2p)$=整数，c=整数，且$0<c<u$，其他节距与同槽式叠绕组相同	上层边在同一槽内的u个元件，其下层边分别在相邻两槽内。换向元件的上层边间互感与下层边间互感的波形不同，电抗电动势波形较平坦。任一元件换向结束时，均存在同槽短路元件的阻尼作用，换向性能较好 线圈为半匝式，鼻端由片头套连接，需一定份额均压线		换向困难的电机
异槽式蛙绕组	甲种	$Y_{1L}=Y_{1W}$ $Y_{kL}=\pm1$ $Y_{kW}=K/p\pm1$ $Y_{kW}-Y_{kL}=K/p$ $Y_{2L}+Y_{2W}=K/p$	波、叠绕组第一节距相等。同槽波、叠绕组元件上层边分别接在相距K/p片的两等电位换向片上，其间只需包匝间绝缘	具有一般蛙绕组和异槽式的特点 同槽波、叠绕组元件下层边分别接在同一换向片上，可合成一根导体，槽利用率高。下层整根导体对槽漏磁的阻尼作用强，但附加损耗稍大 半匝式线圈分层下线，分层绑扎端部，机械强度高	高速中型电机
	乙种	$Y_{2L}=Y_{2W}$　$Y_{kL}=\pm1$ $Y_{kW}=K/p\mp1$ $Y_{kW}+Y_{kL}=K/p$ $Y_{1L}+Y_{1W}=K/p$	波、叠绕组第二节距相等。同槽波、叠绕组元件上层边分别接在同一换向片上，其间只需包匝间绝缘		
拉图尔叠绕组		$Q/(2p)$=整数 $\varepsilon_k=u$ $Y_{1L}=K/(2p)+u$ $Y_{1s}=K/(2p)-u$ $Y_{2L}=Y_{1L}-m_L$ $Y_{2s}=Y_{1s}-m_L$	由接在同一换向器上的两套叠绕组组成，一为长距(l)，另一为短距(s)，$m_L=2$时均为双闭路，通常做成单叠绕组 接在相同两换向片上的两长、短距元件轴线重合，电动势相等。同槽两长、短距元件的相应边接在互相隔开的两换向片上，为异槽式，不同时换向，互感小，电抗电势波形较平坦，但换向区较宽 需接节距为K/p的均压线，均压线在换向器端		转速较高的中大型电机
拉图尔蛙绕组		$Q/(2p)$=整数　$\varepsilon_k=u$ $Y_{1L}=Y_{1W}=K/(2p)-u$ $Y_{kL}=\pm m_L$ $Y_{kW}=K/p\mp m_L$ $Y_{kW}+Y_{kL}=K/p$ $Y_{2L}=K/(2p)-u\mp m_L$ $Y_{2s}=K/(2p)+u\mp m_L$	是将整距蛙绕组所有上层或下层元件边移过一槽所得的短距绕组 同槽波、叠元件的相应边接在互相隔开的两换向片上，为异槽式，不同时换向，互感小，电抗电势波形较平坦，但换向区较宽 $m=2$时叠绕组为双闭路，故常做成单蛙或三蛙绕组		转速较高的中大型电机
对称双叠绕组		Q/p=偶数 K/p=偶数 $Y_1=K/(2p)\pm1$ $Y_2=K/(2p)\mp1$ $Y_k=\pm2$	是双叠双闭路绕组，接全额甲种和全额丙种均压线 为使两个闭路间有等电位点，$u=1$时，应取$\varepsilon_k=1$；$u>1$时，必须为异槽式。被电刷短接的回路只有元件匝数的一半，换向性能大为改善，结构，工艺复杂，电枢通风困难		大容量宽速比高速电动机和高速发电机
不对称双叠或双蛙绕组		K/p=奇数 Q/p=奇数 节距同一般双叠绕组	同一对极下重路间存在不对称电动势，但在电枢一端有等电位点，$p\geqslant3$时可连兼起甲、乙种作用的均压线。配以多重波绕组可组成不对称双蛙绕组，为减少其中波绕组的闭路数，必要时将开口绕组接成交叉绕组。高速时电刷滑动接触的变化对换向影响较显著，为减少不对称性对换向的影响，大型电机应选$Q/(2p)\geqslant19.5$，高速中型电机应选$Q/(2p)\geqslant16.5$。为获得单闭路，p尽可能选用奇数		中大型电机

5 均压线

连接绕组内并联支路间等电位点的导线称为均压线。

在多极单叠绕组中，即使绕组满足对称条件，磁路不对称仍将导致各并联支路的感应电动势不等，从而在绕组内部产生环流。环流通过电刷将使换向恶化，并使各支路的电流分配不均，绕组铜损耗增加。

在多重路绕组中，除各重路的电刷接触电阻不等而使各重路并联支路电阻不等外，不对称绕组的重路间不对称电动势引起片间电压脉动等原因，使各支路的电流分配不均，换向片间电压分布不正常，导致换向恶化。因此，除蛙绕组外，所有$a>1$的绕组，均需用低电阻导线将各对支路在理论上的等电位点连接起来，以消除或减轻上述不良影响，获得满意的换向条件。

5.1 分类

1）甲种均压线，亦称第一种均压线。用来改善电机磁场不对称的均压线。一般用于多极单叠绕组或多叠绕组的各重路内。

2）乙种均压线，亦称第二种均压线。用来保证绕组各并联支路电阻相等，并使换向片间的电压保持均等，而等电位点在电枢铁心同一端的均压线。一般用于多重路绕组的各个重路之间。

3）丙种均压线，亦称第三种均压线或Punga连接线。用来使换向片间电压均等，而等电位点在电枢铁心两端。一般用于对称叠绕组两独立的重路之间，或$2p/a$为奇数的双波绕组中。丙种均压线要在铁心和轴之间穿过，结构复杂。

5.2 根数

电枢绕组作全额均压连接时，均压线的根数为N_{eqn}，见表4.5-3。

只有某些大型和换向困难的电机才采用全额均压连接。一般中小型电机通常每槽只接一根均压线，低转速电机还可再少一些。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 4.5-3 常用绕组均压连接的特点

绕组型式		均压线节距 y_{eq}	全额根数 N_{eqm}	均压线种类
单叠	满足第一种对称条件	K/p	K/p	甲种
双波	满足第一种对称条件，且 $2p/a$=偶数	K/a	K/a	乙种
	满足第一种对称条件，且 $2p/a$=奇数	$(K-Y_k)/a$	K	丙种
双叠	满足第二种对称条件，且 K/p=偶数，t=2	K/p	K/p	全额甲种，接重路内各等电位点
		见图 4.5-4(f)	K	全额丙种，接重路间各等电位点
	满足第二种对称条件，且 K/p=奇数，p=奇数 t=1	K/p	K/p	$p\geq3$ 时兼起甲、乙种的作用，接重路内各等电位点

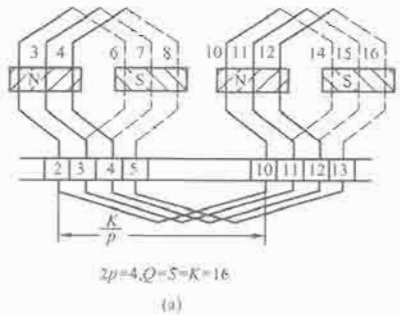
实际采用的均压线根数 N_{eq} 与 N_{eqm} 之比称为均压线的份额。份额数越大，均衡效果越好，但布置越困难。非全额均压线应注意其在圆周上的均匀分布，以保证它们的均压作用。

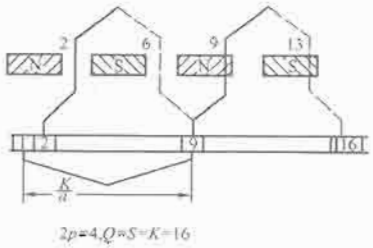
5.3 截面积

均压线的截面通常为电枢绕组导体截面积的 20%～50%。均压线份额数高时，其截面积可相对较小，但截面积过小将降低均压效果，而截面积过大，不但增加用铜量，而且导致均压线布置困难。

5.4 连接

常用绕组均压连接的特点见表 4.5-3，接线如图 4.5-4（f）、图 4.5-4（g）和图 4.5-5 所示。





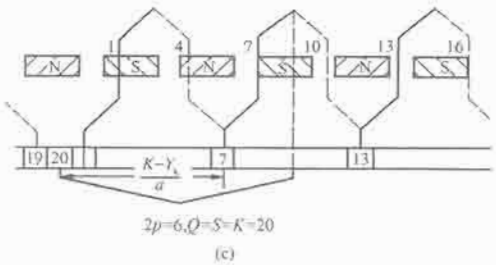


图 4.5-5 常用绕组的均压连接
（a）单叠绕组甲种均压连接；（b）双波绕组乙种均压连接；（c）双波绕组丙种均压连接

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 6 章　整流电源对直流电动机性能的影响

为提高技术经济指标、维护方便和设备小型化，随着大功率晶闸管的出现和自动控制技术的提高，晶闸管变流器电源（简称整流电源）在电气传动系统中已基本代替直流发电机组（简称机组）作直流电动机的供电电源。但是，整流电源输出的是含有脉动分量的电压和电流，这会对电动机的运行性能带来不良影响，如换向性能恶化、发热体温度上升、振动噪声增大，还会提高电动机绝缘要求和产生高频轴电压等，必须分别采取相应的措施。

1　脉动电流

整流电源输出的电流是脉动的，如图 4.6-1 所示。其电流波形的品质一般可用电流波形因数 K_{wi} 或电流脉动率 μ 来表示。

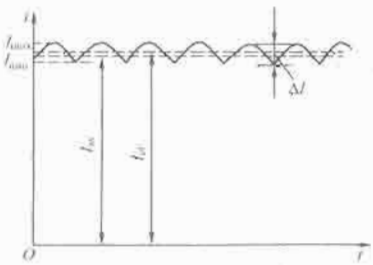


图 4.6-1　脉动电流波形

脉动电流波形因数为其有效值 I_{ef} 与平均值 I_{av} 之比，即

$$K_{wi}=\frac{I_{ef}}{I_{av}} \tag{4.6-1}$$

脉动电流的脉动率 μ 是一个周期内电流最大值与最小值之差与平均值之比，以百分数表示，即

$$\mu=\frac{(I_{max}-I_{min})}{I_{av}}\times 100\% \tag{4.6-2}$$

为降低电流脉动，常在整流电源的直流侧串接平波电抗器。这样，不但可以降低电流脉动率，而且在轻载时还能防止电流不连续，以免引起回路时间常数变化而影响电动机的动态特性。此外，采用较多的整流相数，增加外接电抗器的电感量或改进直流电动机设计以增大电机本身的电感值，均可改善电流波形的品质。

2　对换向的影响

2.1　脉动电流对换向的影响

作为直流电动机电枢电路供电电源的整流电源，在正常状态下运行时，提供的电枢电流是个周期性的脉动变量。由于磁路内涡流的阻尼作用，换向极磁通滞后于脉动电流的变化，使电机的换向恶化。由磁路时间常数确定的换向极磁通与电枢电流之间的相位差的周期性变化，可以用 Lissajou 图形来描述。图 4.6-2 是用换向极磁通随电枢电流变化表示的无火花区与 Lissajou 图形（图中的椭圆）的组合，图中 mm′ 与 nn′ 间的区域表示无火花区。如果换向极磁通不滞后，即使电枢电流脉动，Lissajou 图形是条直线，只在无火花区中心线 OA 上移动，不会出现火花；如果换向极磁通滞后，

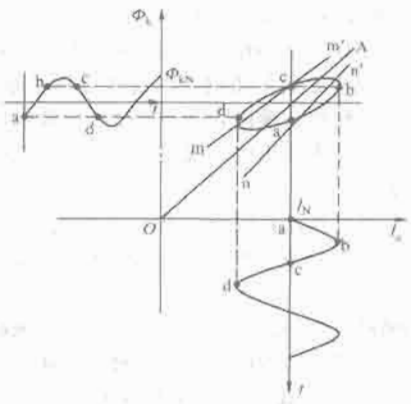


图 4.6-2　整流电源供电时换向极磁化特性与无火花区之间的关系

Lissajou 图形变成椭圆形，此椭圆超出无火花区的部分就会有火花发生。

可见换向允许的电流脉动率随机组供电时的无火花区宽度、换向极磁路的时间常数及脉动频率而变化。一般，容量大、弱磁调速范围宽、最高转速高的电动机，其换向允许的电流脉动率较小。图 4.6-3 是用三相六脉波整流电源时，他励直流电动机允许的电流脉动率范围。

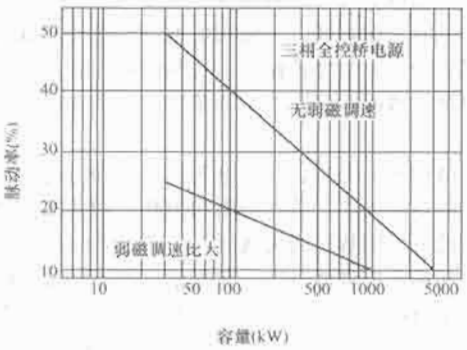


图 4.6-3　允许的电流脉动率

作为直流电动机励磁电源的整流电源，在正常状态下工作时，提供的励磁电流是周期性的脉动变量，使主极磁通随着脉动，从而在电枢绕组换向元件内产生变压器电动势，加重了电动机换向的负担和复杂性。但是，主极绕组电感一般很大，因而励磁电流脉动率较小，可以忽略它的影响（参见本篇 4 章）。

2.2　动态过程中的换向

2.2.1　电枢电流快速变化时的换向

在动态过程中直流电动机电枢电流发生急剧变化时，由于换向极磁路中涡流的阻尼作用，使换向极磁通的变化远远落后于电流变化，造成换向失调而可能发生强烈火花，其程度取决于电流变化率和电流增量。

在整流电源供电的传动系统中，由于电源具备极高的快速反应性能，因而在缩短电机过渡过程的同时，对电动机在

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

动态过程中的换向能力提出了更高的要求，以免由此引发电动机的换向故障。

电动机动态换向允许的电流变化率 $di/d\iota$，取决于它在稳态时的无火花区宽度和换向极磁路的响应性能。磁路全部采用叠片结构情况下，电流变化率最大可达每秒(200～300)I_N。一般，小型电机允许的电流变化率 $di/d\iota$ 较大，大型电机较小，高速时较小，低速时较大。

2.2.2 强行励磁对换向的影响

直流电动机往往采用强励来加速其过渡过程，强励电压倍数越大，每极磁通量变化越大，过渡过程就越短。但是，主磁通的快速变化将在换向元件中产生变压器电动势，其值与每极磁通的变化率成正比，远远大于脉动励磁电流引起的变压器电动势。

整流电源能提供比直流励磁机大得多的强励电压，强励时往往因变压器电动势过大而产生强烈火花，成为电机换向故障的一个重要原因。

为减小强励过程中的变压器电动势，对于强励倍数高的电动机，在设计时可增加极数，减少每极磁通量；在电动机电抗电动势允许的前提下，减少电刷覆盖换向片数；强励时，根据电动机的实际运行情况，选择适当的磁通变化率 $d\Phi/d\iota$。

3 对发热的影响

整流电源供电时会引起电动机温升增加，其主要原因是绕组铜损耗增大。绕组铜损耗与电流有效值的二次方成正比，由于整流电源输出电流的波形因数 K_{ss} 大于1，因此，电动机的铜损耗将为机组供电时的 K_{ss}^2 倍。电流脉动率越大，随着波形因数增大，对电动机发热的影响也越大。

整流电源供电时，除直流铜损耗外，脉动电流分量还在绕组中产生附加铜损耗，主极和电枢反应磁通的脉动分量还在铁磁回路中产生附加铁损耗。这些损耗的总和将增加电动机的发热量，因而在相同的冷却条件下，电动机的温升将比机组供电时高。

如维持相同的温升，整流电源供电时的电动机输出功率应比机组供电时的小，若忽略附加损耗，则其输出功率的减小约与电流波形因数的增大成反比。若计及附加损耗，电动机的输出功率还要降低一些。在电枢电路不外接电抗器的条件下，小型直流电动机由三相全控桥式整流电源供电时，其电流脉动率约为30%～40%，此时电动机的输出功率为机组供电时的95%左右；由单相桥式整流电源供电时，电流波形因数在1.3～1.5范围内，此时电动机的输出功率约为机组供电时的50%～60%。对于功率较大的大中型直流电动机，由于采用六相、十二相整流供电，电流波形品质较好，其对电动机温升的影响可忽略不计。

4 对振动和噪声的影响

直流电动机由整流电源供电时，铁心的高频脉动磁化力和转矩脉动会使电动机在运行中的振动和噪声增大。脉动量越大，振动和噪声也越大。在电动机变速运行时，还可能诱发机械共振。此外，脉动电流还会引起绕组及其连接线上电磁力的脉动，从而使它们发生高频颤动，引起绝缘损伤，甚至造成疲劳性绝缘破坏。在电枢电流经常处在断续状态及在整流电源励磁可逆系统的电动机中，电磁力的脉动振幅更大，引发的后果更显著。

选用脉动量小的整流电源，电路内串接平波电抗器，增加电动机机体刚度，定、转子进行真空压力整浸绝缘处理以增强绕组和铁心的整体性，电枢采用斜槽及加强所有绕组和连接线的紧固措施，均有助于减小振动和噪声，提高电动机的运行可靠性。

5 对绕组绝缘的要求

绕组的电感与匝间电容组成一个分布参数电路。当电源电压的高次谐波分量或系统的开关浪涌电压作用于绕组两端时，将使绕组匝间电压分布不均，绕组首末几匝的匝间电压较高，应加强它们的绝缘。

为使电枢绕组免受此类影响，当系统采用外接电抗器时，把电抗器与换向极、补偿绕组分别接在电枢两端；当系统不接电抗器时，将换向极、补偿绕组分成两组，分别接到电枢两端，以保护电枢绕组，如图4.6-4所示。

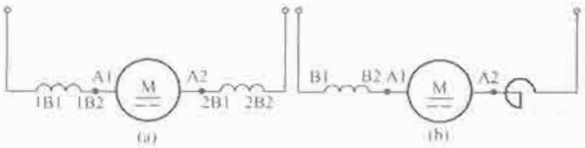


图4.6-4 保护电枢绕组的接线方式
(a) 无外接电抗器；(b) 有外接电抗器

6 电动机的轴电压

电动机在运行中由于磁路不对称或补偿绕组、换向极绕组、串励绕组的接线不当等原因，将在电枢轴的两端产生轴电压。此电压在轴承、轴承座（或端盖）对地之间形成回路，产生轴电流，导致轴承油膜破坏，轴瓦表面烧损。对于这种轴电压，可在轴承座（或端盖）和地之间垫绝缘板隔断回路，以防止轴电流的危害。

电动机由整流电源供电时，除了可能存在上述的轴电压外，由于电源的高频谐波电压作用在电枢绕组对铁心、轴颈对轴瓦、电源装置对地等电容回路上，产生轴对地的高频感应轴电压。谐波电压越高，此类轴电压也越高，甚至发生轴承油膜电击穿。垫绝缘板的方法不能防止高频感应轴电压对轴承油膜的电击穿。一般采用接地电刷，使轴与地之间短接，轴电流不经过轴颈、轴瓦（或滚动轴承），从而防止轴电流的危害。

7 电动机额定电压与整流电源输出电压的匹配

除带来上述影响外，整流电源输出电压与电动机额定电压的匹配，特别在小功率电气传动系统省略整流变压器的情况下，也十分重要。根据直流电动机的运行要求和使用条件，选择适当的整流电源参数和控制系统，是整流电源—直流电动机调速系统可靠运行的保证。

与直流发电机不同，整流电源采用调节触发延迟角的方法调节输出电压，触发延迟角越大，电压越低，输出电压和电流的波形品质越差。若电动机额定电压相对整流电源输出电压选得过高，则系统不能正常运行；若选得过低，在电动机额定电压下整流电源触发延迟角已经较大，整流电源对电动机的不良影响就会增大。

为了与整流电源输出电压匹配，电动机额定电压的选择一般应考虑：

1）电网电压及其正常波动幅度。

2）控制系统的调节裕度。对不逆转传动系统，应考虑最小触发延迟角的限制；对可逆转传动系统，应考虑最小逆变颠覆角的限制。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3）交流侧进线电抗和直流侧平波电抗的压降。

4）整流装置本身的电阻压降和管压降。

当采用单相全波整流线路，电网电压为 220V 时，电动机额定电压可取 160V。采用三相桥式整流线路，电网电压为 380V 时，第一象限运行的直流电动机的额定电压取 440V；第四象限运行的直流电动机的额定电压取 400V。对于容量较大、系统中不能省略整流变压器的大中型直流电动机，其额定电压应根据整流变压器及整流元件的电压等级、元件串并联技术和电动机的制造和运行等多方面的情况来确定。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第7章 电磁设计

电磁设计的任务是，按电机额定数据确定其与电磁有关的几何尺寸和绕组数据，计算换向参数、工作特性和温升、效率等，使其满足相关国家标准和产品技术条件的规定。

电磁设计的程序，一般分以下几步：

1）根据电磁负载经验值，初步确定电枢铁心直径、长度和相应的主、换向极极数。

2）确定电枢绕组、电枢铁心、换向器和电刷的主要尺寸。

3）确定磁路各部尺寸，计算空载特性曲线、电枢反应去磁磁动势，确定励磁绕组。

4）计算换向参数，确定换向极和补偿绕组。

5）计算损耗、效率和工作特性。

6）估计温升和冷却空气的风量和风压，确定风扇或外接风机的相关尺寸。

电磁设计中使用的电磁负载参数，往往由制造厂逐年积累，编制成表格、曲线或经验公式。它们与电机的运行要求、环境条件、结构型式、通风方式、绝缘等级、工艺方法等密切相关。只有正确选择电磁负载参数，才能生产出性能优良、经济合理的产品。

电磁设计时，还应考虑电机的系列性。有些设定尺寸，如机座截面等，在结构设计时可作适当调整。结构设计中的一些重点问题，如通风散热方式、外形尺寸等，也应在电磁设计阶段统一考虑。

1 主要尺寸和极数

直流电机的主要尺寸是指电枢（铁心）直径 D_a（mm）和长度 l_a（mm）。由此得出的 $D_a^2 l_a$（mm^3）与额定功率、额定转速和所选的电磁负载有以下关系

$$D_a^2 l_a = \frac{6.1\times10^{10}}{\alpha_\delta B_\delta A}\frac{P_{em}}{n_N} = C_A\frac{P_{em}}{n_N} \qquad (4.7\text{-}1)$$

式中，α_δ 为主极极弧系数；B_δ 为主极气隙磁通密度，T；A 为电枢线负荷，A/cm；C_A 为电机常数，$mm^3\cdot r/(min\cdot kW)$；$n_N$ 为额定转速，r/min；P_{em} 为电磁功率，kW。

$$P_{em} = \frac{P_N(1+\eta)}{2\eta} \qquad (4.7\text{-}2)$$

式中，P_N 为电机额定功率，kW；η 为电机额定功率时的效率。

根据电机额定功率 P_N，由图 4.7-1❶查出电机估计效率

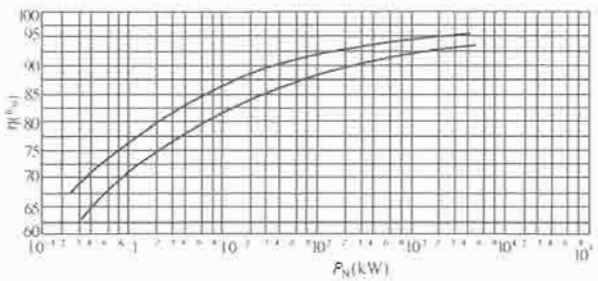


图 4.7-1 直流电机的估计效率

❶ 本章所有图中的参数，均为F极绝缘、外鼓风、连续工作制电机的参数。

η，按式（4.7-2）算出电磁功率 P_{em}。根据 P_{em}/n_N 比值，从图 4.7-2 查得电机常数 C_A，按式（4.7-1）就可求得 $D_a^2 l_a$ 的初步值。

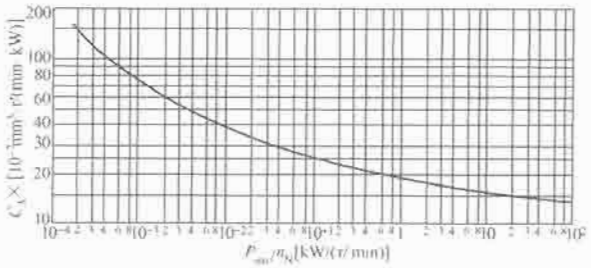


图 4.7-2 电机常数 C_A 与 P_{em}/n_N 的关系

1.1 主要尺寸

1.1.1 电枢（铁心）直径

$D_a^2 l_a$ 值确定后，一般先选 D_a。D_a 随电机 P_N/n_N 值的增大而增大，可用 P_N/n_N 值在图 4.7-3 的曲线上查得该电机的直径范围，再参照电枢直径系列选定 D_a。

为了降低电枢的转动惯量，可以选择小一级直径，而换向困难的电机则选用大一级直径。

系列设计中，对 P_N/n_N 值接近而规格不同的电机，常选用同一电枢直径和不同铁心长度。此时，应按其中最大的 P_N/n_N 值选图 4.7-3 中曲线的下限值，确定电枢直径。

考虑机械强度，电枢铁心外径的圆周速度 v_b 通常应满足下列要求：

小型直流电机 $v_b\leqslant35$m/s；中大型直流电机 $v_b\leqslant55$m/s；大型或高速直流电机在转动部件采取措施后 $v_b\leqslant65\sim70$m/s。

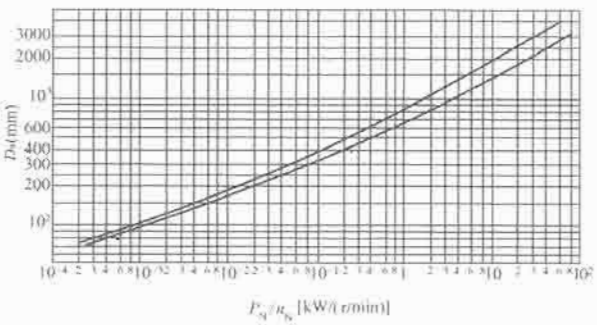


图 4.7-3 电枢直径 D_a 与 P_N/n_N 的关系

国内曾经采用的统一电枢直径系列（mm）为：70，83，102，106，120，138，162，198，210，245，294，327，423，493，560，740，850，990，1200，1500，1800，2150，2500，2850，3150，3500，3800。根据实际情况，各厂已用与之相近的数字组成自己的新直径系列。

考虑硅钢片的合理套裁，$D_a\leqslant990$ 时，采用整圆冲片；$D_a>990$mm 时，采用扇形冲片拼成整圆。

1.1.2 电枢（铁心）长度

电枢（铁心）长度 l_a（mm）由选定的 $D_a^2 l_a$ 和 D_a 确定

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$l_a = D_a^2 l_a / D_a^2$$

从电机的换向性能、通风发热、机械强度和工艺方法等方面考虑，对应于每个 D_a，电枢铁心的最大长度 $l_{a\max}$ 应满足下列条件：$D_a \leqslant 2500$mm 时，$l_{a\max} < (750 + 0.4D_a)$mm；$D_a > 2500$mm 时，$l_{a\max} < 1700$mm。

大中型和个别小型直流电机，常以 8～10mm 宽的通风沟，沿长度把电枢铁心分成几段，每段长约 50～80mm，以改善通风散热和导热体的温度场分布，降低最热点温度和平均温升。

1.1.3 电枢长度与直径的比

电枢长度与直径的比 $\lambda (= l_a / D_a)$ 是考核电机的重要经济技术指标。

λ 值小，长度短而直径大，有利于通风散热，且可减小电抗电动势，有利于电机换向，但技术、经济指标较差。

λ 值大，长度长而直径小，电枢转动惯量小，有利于转速的快速变化，经济技术指标高，但换向性能和通风散热条件变坏。

根据电机用途和特性确定电枢铁心直径和长度后，应核对 λ 值是否在经验值范围内。

近年来为适应发展需要，随着设计、工艺和绝缘水平的上升，λ 值有明显提高：小型电机 λ 值在 2.0 左右，中型电机 $\lambda = 1 \sim 2.0$，大型电机 $\lambda = 0.4 \sim 0.8$。

1.1.4 电磁负载与主极极弧系数

从式（4.7-1）得到电机常数

$$C_A = \frac{6.1 \times 10^{10}}{\alpha_\delta B_\delta A} \tag{4.7-3}$$

可见，电机的主要尺寸直接与选用的电磁负载 A、B_δ 及主极极弧系数 α_δ 相关。

$$\alpha_\delta = \frac{b'_\mu}{\tau} \tag{4.7-4}$$

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} \tag{4.7-5}$$

$$A = \frac{10ZI_a}{2a\pi D_a} \tag{4.7-6}$$

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_a} \times 10^6 \tag{4.7-7}$$

式中，b'_μ 为主极极靴计算弧长，mm；τ 为主极极距，mm；$2p$ 为主极数；Z 为电枢绕组总导体数；I_a 为额定电枢电流，A；$2a$ 为电枢绕组并联支路数；Φ 为额定转速、电压和电流时的主极每极气隙磁通，Wb。

不同电枢直径选用的 A 与 B_δ 参考值分别如图 4.7-4 和图 4.7-5 所示。

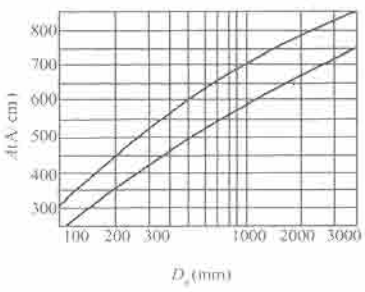


图 4.7-4 电负载 A 与电枢直径 D_a 的关系

应根据各种电机的不同技术要求来选择 A 与 B_δ 值：A 值若过高，特别是高速电机，将使电机换向性能恶化、电枢温度升高。而在高参数大型直流电机中，为了解决采用高参数带来的换向和温升两个问题，往往采用变断面电枢线圈、降低电枢槽高等措施。

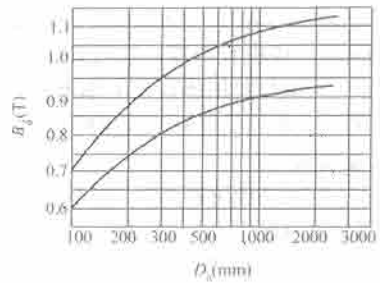


图 4.7-5 主极气隙磁通密度 B_δ 与电枢直径 D_a 的关系

B_δ 值若过高，将引起电机铁心特别是电枢齿部过分饱和，带来一系列问题：励磁及铁心损耗增加，电机效率降低，温升上升等。高速电机因磁通交变频率提高，铁损耗较大，B_δ 更不宜过高。

不同电枢直径选用的 α_δ 参考值如图 4.7-6 所示。

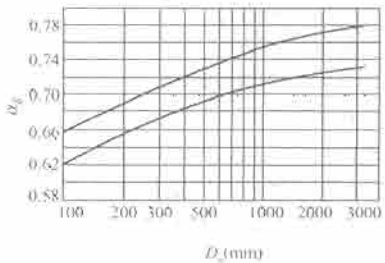


图 4.7-6 α_δ 与 D_a 的关系

选择大的 α_δ 值，对缩小电机主要尺寸有利，但极间距离变窄，磁极漏磁增加，使电机换向参数变坏。

小电机由于主极间距离较窄，α_δ 应选得较小。对于同一电枢直径的电机，极数较多时 α_δ 宜选小些；极数较少时，除两极电机外，α_δ 可选大些。

选定 α_δ、A 及 B_δ 值后，应代入式（4.7-3）核算 C_A 值，并核查它是否接近图 4.7-2 曲线，否则应重新选择 D_a、l_a 等参数，反复调整。

1.2 极数

直流电机的主极极数一般随电枢直径增大而增加。常用的主极极数，见表 4.7-1。小型电机为了提高电枢电路电感，尽量采用 2 极。

表 4.7-1 常用的主极极数

D_a（mm）	70～120	138～560	650～1200	1500	1800
$2p$	2	4	6	8	8～10
D_a（mm）	2150	2500	2850	3150	3500～3850
$2p$	10	12	14	16～18	18～24

为了使每刷杆的电流不超过 1000～1200A，额定电压较高的电机常选用较少的极数，而低电压、大电流电机常选用较多的极数。主极极数还受极距 τ 的限制，一般中小型电机 $\tau = 120 \sim 500$mm；大型电机 $\tau = 450 \sim 700$mm。

电枢直径与主极气隙磁通密度确定后，主极气隙总磁通 $2p\Phi$ 为一定值。增加主极极数，可减少每极磁通、缩短换向器及电枢绕组端部长度、降低定子磁轭高度，从而减轻用铜量和磁轭铁重，缩小电机外形；对有强励的直流电动机，还

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

可减小强励过程中的变压器电动势，避免出现强烈换向火花。但极数增加不仅会使电枢中交变磁化频率增高，引起温升、铁损耗和制造工时增加，而且极距缩短使主极漏磁增加，可能需要缩小主极极弧长度、选用较小的 α_δ 值而导致电机 $D_a^2 l_a$ 值增大；极数增加还会使电枢电路电感下降。面对这些互相矛盾的关系，设计时极数应根据对电机的具体要求经过综合比较后确定。

换向极极数一般与主极极数相等。在小型偏小或某些结构紧凑、维护困难的电机里，换向极极数有时只有主极极数的一半，此时每个换向极上的换向极线圈的匝数应增加一倍。

2 电枢

2.1 电枢绕组

电枢绕组是电机感生电动势，产生电磁转矩，实现能量转换的关键部件之一，有波绕组、叠绕组和蛙绕组等型式（参见本篇第5章）。在选择绕组型式时，应综合考虑下述因素：

1）绕组各支路内的电流。

2）换向片间电压。

3）换向元件中的电抗电动势。

4）绕组的热负载。

2.1.1 绕组型式

为了便于制造线圈，支路电流 i_a 一般不宜超过350A。因此，电枢绕组的并联支路对数 a 应为

$$a = \frac{I_N}{2i_a} \approx \frac{I_N}{700}(\text{取整数}) \qquad (4.7\text{-}8)$$

根据 a 的计算值选择绕组型式：$p \geqslant 2$，$a=1$ 用单波绕组；$p \geqslant 2$，$a=p$ 用单叠绕组；$p>ma>2$（m 为整数），用 m 重波绕组；$p \geqslant 2$ 且 $a=mp$ 用 m 重叠绕组。以单叠绕组为基本绕组，与 p 重波绕组组成单蛙绕组，使用范围同单叠绕组；以 m 重叠绕组为基本绕组，与 mp 重波绕组组成 m 重蛙绕组，使用范围同 m 重叠绕组。此外，还有一些特殊电枢绕组。

绕组的特点、参数、应用范围和均压线参见本篇第5章。

2.1.2 电枢槽数

电枢槽数 Q 在绕组型式确定后，按本篇第5章中的有关规定进行选择，并应注意以下各点：

1）每极槽数 $Q/2p$ 越大，磁通脉振引起的损耗和噪声越小，对多重叠绕组还有改善电动势不对称的作用。通常，$Q/2p$ 的选择范围见表4.7-2。

表4.7-2 每极槽数的选择范围

D_a（mm）	≤245	294～423	493～650	740～990	≥1200
$Q/2p$	6.5～12.5	7.5～14.5	9.5～20.5	12.5～24.5	14.5～28.5

2）电枢槽数过多，会降低槽的利用率，增加加工工时；而电枢齿距 t_a（$=\pi D_a/Q$）过小，容易损坏齿根。因此 t_a 值通常受如下限制：

$D_a \leqslant 300$mm 时，$t_a > 15$mm；$D_a > 300$mm 时，$t_a > 20$mm。

3）为使槽内铜损耗产生的热量易于散出，槽电流总值 I_s 应满足下列要求：

当 $D_a \leqslant 1000$mm 时，$I_s < 1500$A；当 $D_a > 1000$mm 时，$I_s < 2000$A。

2.1.3 每槽元件数和每元件匝数

绕组型式及槽数确定后，便可确定电枢绕组总导体数 Z、每槽元件数 u 和每元件匝数 N_a

$$Z = \frac{2a\pi D_a A}{10 I_a} \qquad (4.7\text{-}9)$$

$$N_a = \frac{Z}{2uQ} \qquad (4.7\text{-}10)$$

通常每槽元件数 $u \leqslant 5$。为避免死线圈引起的绕组不对称，对于 p 为偶数的单波绕组，K 必须是奇数，即 Q 和 u 都应是奇数。

为保证换向良好，尽可能采用每元件匝数 $N_a=1$，中小电机中 $N_a \leqslant 3 \sim 5$。在圆线散嵌的电机中，有时每元件匝数为分数，例如 $N_a = \frac{2+3+2}{3} = \frac{7}{3} = 2\frac{1}{3}$ 匝，参见本篇第5章。

2.1.4 电枢槽形和尺寸

（1）电枢槽形

$D_a \geqslant 200$mm 时，通常采用全开口、平行槽的矩形槽，如图4.7-7（a）及（b）所示；$D_a < 200$mm 时，则采用半闭口、平行齿的梨形槽，如图4.7-7（c）及（d）所示。

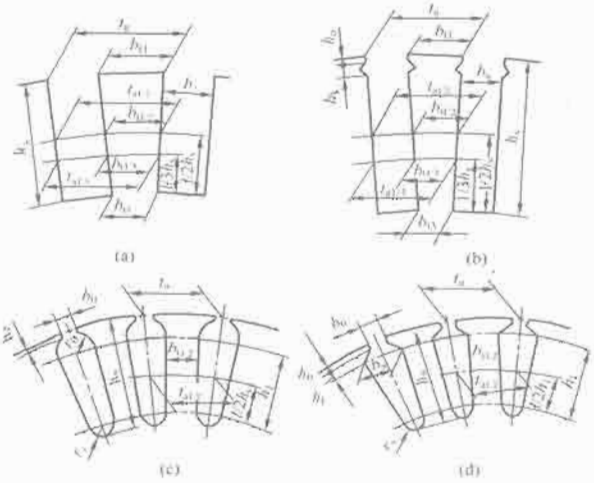


图4.7-7 直流电机的电枢槽形

（a）矩形槽；（b）装槽楔的矩形槽；

（c）半圆顶梨形槽；（d）梯形顶梨形槽

为了改善振动、噪声和多重叠绕组的不对称电动势，常把电枢槽做成斜槽，斜度通常为1个电枢齿距。

（2）电枢槽尺寸

1）矩形槽。

①槽高 h_s 应尽量小，以缩小槽漏磁导，有利于换向。

②槽宽 b_s 一般为 $(0.35 \sim 0.5)t_a$。应注意核算离齿根1/3处的齿根磁通密度 $B_{t1/3} \leqslant 2.45$T，以避免磁路饱和。$B_{t1/3} > 2.45$T 时，应改变线规，加大槽高，使槽宽缩小、齿宽增大。

2）梨形槽。

①槽口高 h_0 约为0.6～0.8mm。

②槽口宽 b_0 约为3～3.5mm，圆线直径大时取较大值。

③槽顶和槽底半圆直径 r_0 和 r_s 按并行齿要求确定，并使齿磁通密度 $B_{Z1/3} \leqslant 1.7 \sim 1.95$T。

④槽满率

$$k_s = \frac{A_\Phi}{A_{sef}} \times 100\% = 75\% \sim 80\% \qquad (4.7\text{-}11)$$

式中，A_Φ 为绝缘电磁线在槽内所占面积，mm²；A_{sef} 为减去槽绝缘及槽楔后的槽面积，mm²。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2.1.5 电枢线圈用导线

采用梨形电枢槽的小型电机，电枢线圈采用圆铜线，导线外径 $d \leqslant 1.60$。单根导线截面不够时，可用两根、最多不超过四根导线并绕。中大型电机的线圈导线截面积较大，采用矩形铜线。大型高参数电机有时选用变截面导线，参见第8章。

根据电机的工作方式和运行条件，在图4.7-8中选定电枢绕组热负载 AJ_a（J_a 为选用的电枢线圈电流密度，A/mm^2），推算出 $J_n = AJ_a/A$。推算出的 J_n 应不超过下列数值：

小型电机 3.5～8.0A/mm²；中、大型电机 5.0～8.5 A/mm²。

导线应有截面积 $A_{cu} = I_N/(2aJ_n)(mm^2)$。据此在线规表中选用合适的导线线规。

（均压线参见本篇第5章）

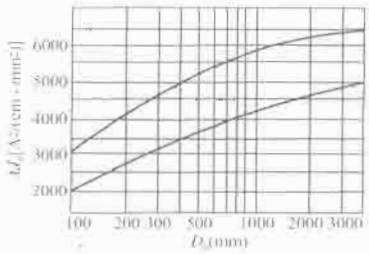


图 4.7-8 热负载 AJ_a 与电枢直径 D_a 的关系

2.2 换向器

2.2.1 换向器直径

小型电机的换向器采用整体换向片，其直径 D_k 接近电枢铁心直径 D_a。中大型电机的换向器，通过升高片与电枢线圈连接，D_k 通常在下列范围内：当 $200 < D_a < 500$mm 时：$D_k \leqslant D_a - 2h_s$；当 $D_a > 500$mm 时，$D_k = (0.6 \sim 0.75)D_a$。

换向器直径 D_k（mm）推荐在国家标准 GB/T 12973—1991《换向器、集电环尺寸》规定的R20系列数值中选用。

换向器的圆周速度 $v_k > 40$m/s 时，换向器结构应采取相应的措施，参见本篇第8章。

2.2.2 换向片长度

换向片长度 l_k（mm）按下式估算

$$l_k = n_b(l_b + 5) + W_1 + W_2 + (20 \sim 50) \qquad (4.7\text{-}12)$$

式中，n_b 为每刷杆电刷数，刷杆数一般等于极数，则 $n_b \geqslant \dfrac{I_N \times 10^2}{pb_b l_b J_b}$（取整数），其中 J_b 为电刷电流密度，采用电化石墨电刷时 $J_b < 12A/cm^2$；W_1 为升高片宽度，mm；W_2 为电刷轴向错位，mm；b_b 和 l_b 为电刷宽度和长度，mm。

2.2.3 换向片数

按结构和工艺要求，由换向片数 K（$=Qu$）确定的换向片距 t_k（$=\pi D_k/K$），应满足下列规定，使换向片不致太薄：$D_k \leqslant 200$mm时，$t_k > 3$mm；$D_k > 200$mm时，$t_k > 4.5$mm。

与换向片数有关的另一重要参数平均片间电压 U_{kav}（$=2pU_N/K$），应不超过一定值以防止产生电位差火花及环火，参见本章5.1.3节。

2.2.4 升高片

升高片材料一般采用0.6～1.6mm软铜板或软铜带，宽10～25mm。为防止频繁正反转或冲击负载引起升高片断裂，有些大型电机采用钢质升高片，应注意解决升高片区域温度上升问题。

3 电刷

电刷特性直接影响电刷与换向器的滑动接触乃至电机换向。选择电刷时需全面考虑对电机的各种要求，包括换向难易程度、圆周速度、通风冷却方式、刷握结构、运行方式、电源类型、转速、负载电流、电刷电流密度、温度、湿度、灰尘、有害气体和振动等。

为使电机进行理想的直线换向，必须保证电刷和换向器间有稳定的滑动接触和高滑动接触电阻，要求电刷生成氧化膜能力强、研磨性小、能生成坚韧而不过度的氧化膜。因此，换向器运行温度不能过低，电机轻载时电刷电流密度小于或等于5～6A/cm²，绝对湿度应在5～12g/m³范围内；表面不附着灰尘和油，周围不含化学气体；含灰分少、不混入异物、材质致密而不产生拾铜（copper-picking）现象，防止换向器表面被研磨出细条纹。此外，还可对电刷采取浸渍措施。

电刷特性有静、动之分。静特性指电刷固有的特性，与原料、制造方法和坯料加压成型方向等有关，包括：电阻率、密度、气孔率、灰分、硬度、抗折强度、弹性系数、黏性系数和热特性等。动特性在短路换向器试验装置上测得，包括接触电压降、摩擦系数和50h磨损等。

3.1 特性和用途

直流电机大多采用电化石墨电刷，部分常用电刷的型号、特性与用途见表4.7-3。

表 4.7-3 部分直流电机常用电刷的型号、特性与用途

类别	电刷型号	电阻率（μΩ·m）	洛氏硬度 HR10	接触压降（V）	摩擦系数 ≤	50h磨损值（mm）	额定电流密度（A/cm²）	允许圆周速度（m/s）	使用时推荐单位压力（kPa）	主要用途
天然石墨基	D172	13	103	2.7	0.25	0.20	12	70	14.7～19.6	换向要求平常的直流电机和励磁机
焦炭基	D214	28	82	2.4	0.25	0.15	10	40	19.6～39.2	高速励磁机、有机械振动的牵引电动机
	D252	15	85	2.5	0.25	0.15	12	45	19.6～24.5	汽轮发电机的励磁机和带有引擎负荷的直流电机
炭黑基	D374B	57	83	2.8	0.25	0.25	12	50	19.6～39.2	牵引电机、汽轮发电机高速励磁机、轧钢电动机和主发电机、换向困难的直流电机
	D374F	57	90	2.7	0.2	0.2	12	50	19.6～39.2	
	D374N	58	83	2.8	0.2	0.2	12	60	19.6～39.2	
	D376	60	99	2.9	0.25	0.25	12	50	19.6～39.2	
	D376N	62	99	2.9	0.20	0.20	12	60	19.6～39.2	

注 表中各项及其参数的测试条件参见部颁标准JB/T 4003—2001。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

与上表中的50h磨损值不同，电刷实际磨耗包括机械磨耗、电磨耗和火花磨耗三大类：

1）机械磨耗。与电刷压力成正比，随压力、表面粗糙度和氧化膜状态而异，比电磨耗小。

多孔质电刷由于摩擦力引起切断、撕裂，因振动、颤动引起疲劳而使颗粒脱落，磨耗较大。绝对湿度在3～5g/m³以下时，滑动接触状态变坏，电刷接触表面附着油和硅蒸气等，也会使磨耗增大。在高空绝对湿度极低时，将产生粉尘磨耗，此时可对电刷采取浸渍措施。

2）电磨耗。电刷滑动接触面内载流点的温度很高，电刷因颗粒氧化脱落而磨耗。电刷电流密度超过10A/cm²时，换向器温度升高，电刷磨耗增大，此时需要特别考虑电机和电刷的散热问题。电刷的极性不同，电磨耗也不一样。

3）火花磨耗。$1\frac{1}{2}$级以上火花大多为电弧放电，能量大、高温氧化燃烧，磨耗剧增。

电刷实际磨耗的容许标准大致为：中小电机2～3mm/(10^3h)，大型电机5mm/(10^3h)，正逆转、冲击负载主电机5～10mm/(10^3h)，牵引主电动机1～2mm/(10^4h)。

3.2 宽度与长度

电刷宽度b_b(mm)应保证电刷能覆盖绕组所要求的最少换向片数，即

$$b_b > (m+1)t_k \qquad (4.7\text{-}13)$$

采用斜刷时，b_b应为电刷斜面与换向器接触的宽度。

在换向区宽度允许的条件下，应选用宽电刷，以降低电抗电动势和缩短换向器。宽度大于20mm的电刷，常用分瓣或分层电刷，以改善电刷对换向器的随动性和接触性能。

电刷长度$l_b=\frac{I_N\times10^2}{n_b p b_b J_b}$（取整数），mm。常用电刷尺寸见表4.7-4。

表4.7-4 常用电刷尺寸 单位：mm

b_b	4	5	6.5	8	10	12.5	16	20	25	32
l_b	5	6.5	8	10	12.5	16	20	25	32	40
	10	8	10	12.5	16	20	25	32	40	50
		10	12.5	16	20	25	32	40	50	
		12.5	16	20	25	32	40	50		
			20	25	32	40	50			
				32	40	50				

4 空载特性曲线和电枢反应去磁磁动势

为了确定电机磁路各部位的尺寸，计算电机在额定状态下的励磁磁动势，设计主极励磁绕组，需要进行磁路计算，亦即空载特性曲线计算。

4.1 空载特性曲线

绘制空载特性曲线时，应先按表4.7-5进行磁路计算。表内各有关尺寸和参数，参见以下各节。

磁路计算时，首先应按下式计算主极每极气隙磁通（主磁通）

$$\Phi=\frac{60aE_a}{pn_N Z} \qquad (4.7\text{-}14)$$

式中，Φ为主磁通，Wb；n_N为额定转速，r/min；$E_a=U\pm(I_aR_a+\Delta U_b)$为电枢电动势，发电机时用"+"、电动机时用"−"，V。电刷接触压降ΔU_b见表4.7-3；R_a为电枢电路内所有绕组电阻的和，Ω。

表4.7-5 磁路计算

磁路段	磁通Φ_i (Wb)	截面积A_i (mm²)	磁通密度B_i (T)		磁场强度H_i (A/cm)	磁路长度L_i (cm)	磁位降F_i (A)
气隙	Φ	$A_\delta=\alpha_\delta\tau_a l_a$	$B_\delta=\frac{\Phi}{\alpha_\delta\tau_a l_a}\times10^6$		—	$L_\delta=0.1\delta$	$F_\delta=0.8K_\delta\delta B_\delta\times10^4$
电枢齿	Φ	—	平行齿	$B_{ta1/2}=K_{t1/2}B_\delta$	$H_{t1/2}$	$L_{ta}=0.1h_1+0.2(r_0+r_s)/3$	$F_{ta}=L_{ta}H_{ta1/2}$
			平行槽	$B_{ta1/3}=K_{t1/3}B_\delta$	$H_{t1/3}$	$L_{ta}=0.1h_s$	$F_{ta}=L_{ta}H_{ta1/3}$
电枢轭	$\frac{\Phi}{2}$	$A_{ja}=K_{Fea}h'_{ja}\times(l_a-n_v b_v)$	$2p\geqslant4$	$B_{ja}=\frac{\Phi}{2A_{ja}}\times10^6$	H_{ja}	$L_{ja}=\frac{0.1\pi(D_a-2h_a-h_a)}{4p}$	$F_{ja}=L_{ja}H_{ja}$
			$2p=2$	$B_{ja1}=B_{ja}$ $B_{ja2}=2B_{ja}/3$	H_{ja1} H_{ja2}	$L_{ja1}=0.1(1-\alpha_\delta)L_{ja}$ $L_{ja2}=0.1\alpha_\delta L_{ja}$	$F_{ja}=L_{ja1}H_{ja1}+L_{ja2}H_{ja2}$
主极铁心	$\sigma\Phi$	$A_m=K_{Fem}b_m l_m$	$B_m=\frac{\sigma\Phi}{A_m}\times10^6$		H_m	$L_m=0.1h_m$	$F_m=L_mH_m$
补偿齿	$\sigma_p\Phi$	$A_{tc1/3}=K_{Fem}l_m\times(b_{t1/3}-Z_{pc}b_{sc})$	$B_{tc1/3}=\frac{\sigma_p\Phi}{A_{tc1/3}}\times10^6$		$H_{tc1/3}$	$L_{tc}=0.1(h_{sc}+h_{0c})$	$F_{tc}=L_{tc}H_{tc1/3}$
定子轭	$\frac{\sigma\Phi}{2}$	$A_j=h_j l_j$	$B_j=\frac{\sigma\Phi}{2A_j}\times10^6$		H_j	$L_j=\frac{0.1\pi(D_j-h_j)}{4p}$	$F_j=L_jH_j$
每极励磁磁动势 $F=\sum F_i=F_\delta+F_{ta}+F_{ja}+F_m+F_{tc}+F_j$							

注 1. $\delta_{max}\leqslant3\delta_{min}$时，等效气隙为$\delta=0.75\delta_{min}+0.25\delta_{max}$。

2. 电枢齿磁通密度大于或等于1.8T时，齿部磁饱和，应以K_0给予修正。

3. 无补偿电机无F_{tc}项。

4. 完成各种绕组电磁设计后，核算在额定情况下运行时，各部件内的磁通密度应在表4.7-6的范围内。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 4.7-6 额定励磁时磁路各部分磁通密度的选择范围

部位		磁通密度（T）	备注	部位		磁通密度（T）	备注
主极气隙		0.50～0.70	小型电机 $2p=2$	电枢轭		1.20～1.60	小型电机 $2p=2$
		0.70～0.90	小型电机 $2p=4$			1.10～1.40	小型电机 $2p=4$
		0.85～1.10	大中型电机			1.10～1.50	大中型电机
电枢	平行齿	1.60～1.80	$B_{t1/2}$	主极	极身	1.20～1.70	$B_{tc1/3}$
	平行槽	≤2.45	B_{tmax}		补偿齿	1.40～1.80	
定子轭		0.95～1.30	铸钢或钢板	主极极面至极靴肩的截面		$0.5B_\delta(b_p-b_m)l_a/l_pb_p\leqslant 2.00$	见图 4.7-9
		1.10～1.50	叠片薄钢板				

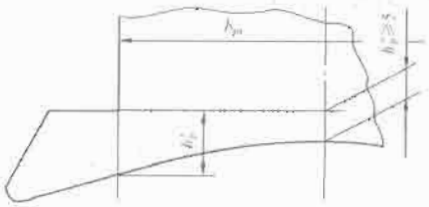


图 4.7-9 主极极肩尺寸

从 $\Phi_1/\Phi_N=0.5\sim1.2$ 中，取 5、6 个主磁通 Φ_1，分别计算它们在各部件内的磁位降 F_i 和每极励磁磁动势 F，再按此 5、6 组 Φ_1 和 F 值，画曲线得到磁化曲线 $\Phi=f(F)$，即空载特性曲线。

空载特性曲线也可转换成用空载时的电枢电动势 E_0 和励磁电流 I_f 来表示，即 $E_0=f(I_f)$。

4.1.1 气隙

（1）气隙种类

主极气隙有均匀气隙，极尖削角的均匀气隙和偏心气隙三类：

1）均匀气隙［见图 4.7-10（a）、（b）］。极靴范围内气隙是均匀的，$b'_p=b_p+2\delta$（有补偿槽和均匀气隙的电机的 b'_p 精确值，需按气隙磁通分布图形计算，b'_p 如图 4.7-10 所示）。

2）极尖削角的均匀气隙［见图 4.7-10（c）］。极靴两端各有约 1/6 弧长倾斜，极尖气隙 $\delta_{max}\approx 2\delta$，$b'_p=b_p$。

3）偏心气隙［见图 4.7-10（d）］。极靴圆弧与电枢外圆不同心，使气隙从主极中心线至极尖逐渐增大，能较好抑制电枢反应引起的气隙磁场畸变，降低换向器片间电压，有利于电机运行稳定，极弧计算长 $b'_p=b_p$。当 $\delta_{max}\leqslant 3\delta_{min}$ 时等效气隙为 $\delta=0.75\delta_{min}+0.25\delta_{max}$。

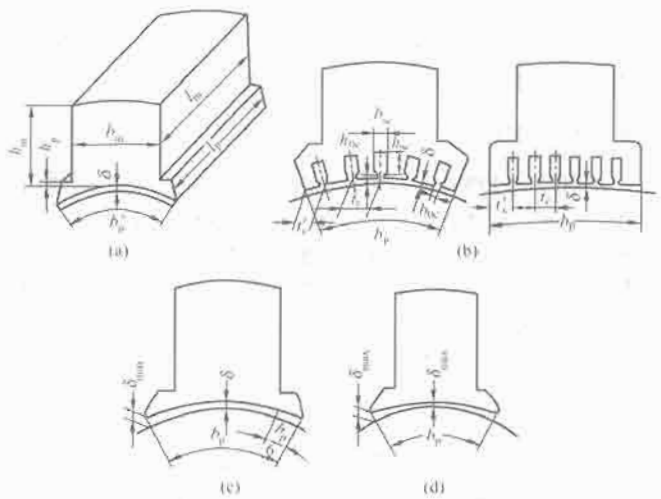


图 4.7-10 气隙和主极形状

（a）均匀气隙；（b）均匀气隙带补偿绕组；（c）极尖削角的均匀气隙；（d）偏心气隙

（2）气隙长度

气隙长度 δ（mm）影响励磁安匝及损耗、气隙磁场畸变、噪声、主极表面损耗和电枢挠度，一般按下式确定：

无换向极 $\delta\geqslant[(4\sim5)A_\tau/B_\delta]\times10^{-6}$

有换向极 $\delta\geqslant[(3\sim3.5)A_\tau/B_\delta]\times10^{-6}$

有补偿绕组 $\delta\geqslant(0.01\sim0.015)\tau$

（3）气隙系数

电枢齿、槽、通风沟及绑扎带沟，影响气隙磁通密度均匀分布，使气隙的磁位降较气隙磁通密度均匀分布时大，两者的比值称为气隙系数 K，可按下式计算：

1）电枢槽气隙系数 $K_{\delta1}=\dfrac{t_a}{t_a-\dfrac{b_0^2}{5\delta+b_0}}$

或

$$K_{\delta1}=\frac{t_a}{t_a-\dfrac{b_s^2}{5\delta+b_s}} \tag{4.7-15}$$

2）补偿槽气隙系数

$$K_{\delta2}=\frac{t_c}{t_c-\dfrac{b_{0c}^2}{5\delta+b_{0c}}} \tag{4.7-16}$$

3）径向通风沟气隙系数

$$K_{\delta3}=\frac{t_v}{t_v-\dfrac{b_v^2}{5\delta+b_v}} \tag{4.7-17}$$

4）电枢绑扎带沟气隙系数

$$K_{\delta4}=1+\frac{n_{1xl}h_{1xl}b_{1xl}}{l_a(\delta+h_{1xl})-n_{1xl}h_{1xl}b_{1xl}} \tag{4.7-18}$$

5）总气隙系数

$$K_\delta=K_{\delta1}K_{\delta2}K_{\delta3}K_{\delta4} \tag{4.7-19}$$

式中，t_a、t_c、t_v 分别为电枢槽、补偿槽的齿距及电枢径向通风沟的节距，mm；b_0、b_s、b_{0c}、b_v 分别为电枢槽槽口、补偿槽槽口及电枢径向通风沟的宽度，mm；n_{1xl} 为电枢绑扎带沟的数量；h_{1xl} 和 b_{1xl} 分别为电枢绑扎带沟的深度和宽度，mm。

4.1.2 电枢齿部

（1）磁通密度系数

电枢齿磁通密度与气隙磁通密度的比称为磁通密度系数 K_t。电枢齿磁通密度可由气隙磁通密度乘以 K_t 求得。

1）梨形槽。大部分齿宽基本不变，梨形槽磁通密度系数为

$$K_{t\frac{1}{2}}=\frac{t_a l_a}{b_{t\frac{1}{2}}K_{Fen}(l_a-n_v b_v)} \tag{4.7-20}$$

式中，K_{Fen} 为电枢铁心叠装系数，用 0.5mm 涂漆钢片时一般取 0.93；$b_{t\frac{1}{2}}$ 为齿中部宽度，mm。

2）矩形槽。齿宽自齿顶至齿底逐渐变窄，磁通密度系数分别为

$$K_{t\frac{1}{2}}=\frac{t_a l_a}{b_{t\frac{1}{2}}K_{Fen}(l_a-n_v b_v)} \tag{4.7-21}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$K_{t\frac{1}{2}}=\frac{t_a l_a}{b_{t\frac{1}{2}}K_{Fea}(l_a-n_v b_v)} \tag{4.7-22}$$

$$K_{t3}=\frac{t_a l_a}{b_{t3}K_{Fea}(l_a-n_v b_v)} \tag{4.7-23}$$

式中，$b_{t\frac{1}{2}}$、$b_{t\frac{1}{3}}$、b_{t3} 分别为距齿根 $h_s/2$、$h_s/3$ 处及齿根的齿宽，mm，如图 4.7-7 所示。

(2) 槽齿截面比

电枢齿部磁通密度若大于 1.8T，计算磁位降时应以槽齿截面比 K_n 给予修正，如图 4.7-11 所示。

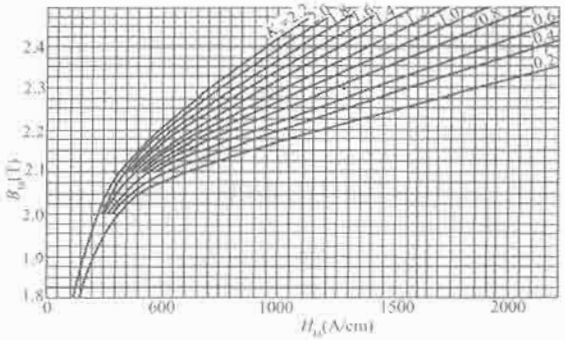


图 4.7-11 齿磁化曲线（DR 510-50 硅钢片）

1) 梨形槽的槽齿截面比

$$K_n=\frac{(r_0+r_s)l_a}{b_{t\frac{1}{2}}K_{Fea}(l_a-n_v b_v)}$$

或

$$K_n=\frac{\left(\frac{b_s}{2}+r_s\right)l_a}{b_{t\frac{1}{2}}K_{Fea}(l_a-n_v b_v)} \tag{4.7-24}$$

式中，r_0、r_s、b_s 如图 4.7-7 所示。

2) 矩形槽的槽齿截面比

$$K_n=\frac{b_s l_a}{b_{t\frac{1}{3}}K_{Fea}(l_a-n_v b_v)} \tag{4.7-25}$$

4.1.3 电枢轭部

电枢轭的计算高度：

1) 梨形槽

$$h'_{ja}=h_{ja}+\frac{1}{3}r_s-\frac{2}{3}d_v \tag{4.7-26}$$

2) 矩形槽

$$h'_{ja}=h_{ja}-\frac{2}{3}d_v \tag{4.7-27}$$

式中，h_{ja} 为磁轭高度，mm；d_v 为轴向单排或交叉双排通风孔直径，mm，无通风孔则 $d_v=0$。

4.1.4 主极

主极形状按气隙类型和有无补偿槽确定（见图 4.7-10），主要尺寸有：

1) 极身长 l_m 与极靴长 l_p（mm）。一般与电枢铁心长 l_a 相同。

2) 极弧长 b_p（mm）。根据 b'_p（$b'_p=\alpha_\delta\tau$，α_δ 的参考值参阅图 4.7-6）和气隙 δ 计算，参见本章 4.1.1 节。

3) 极身宽度

$$b_m=\frac{\sigma B_\delta b'_p l_a}{B_m K_{Fem} l_m} \tag{4.7-28}$$

式中，B_δ、B_m 分别为额定励磁时气隙磁通密度及主极极身磁通密度，T；K_{Fem} 为主极铁心叠装系数，钢板厚 0.5、1.0、1.5mm 时为 0.93、0.95、0.97；σ（=1.15～1.2）为主极漏磁系数。

4) 主极高度 h_m，当 $2p=2$ 时，初步可取 $h_m=$（0.4～0.5）b'_p；当 $2p\geq4$ 时，初步可取 $h_m=$（0.7～0.9）b'_p。

主极补偿齿部分的极靴漏磁系数 $\sigma_p=1.06\sim1.1$。

表 4.7-5 磁路计算中主极补偿齿部分的 $b_{p\frac{1}{2}}$ 按下式计算

$$b_{p\frac{1}{2}}=\frac{D_a+2\delta+2(h_{0c}+h_{sc})/3}{D_a+2\delta}b_p$$

式中，h_{0c}、h_{sc} 等如图 4.7-10 所示。

4.1.5 定子轭部

定子轭长度 l_j 至少要覆盖主极线圈的端接部分。初步可取 $l_j=$（0.8～2.2）l_a（mm），定子轭厚度 h_j 除按定子轭部磁通密度确定（见表 4.7-6）外，还应考虑机械强度和刚度的要求。

4.2 电枢反应去磁磁动势

无补偿直流电机在额定运行情况下，每极气隙、电枢齿的磁位降 $F_{\delta N}$ 与电枢反应每极磁动势 $b'_pA/2$ 叠加，引起主极下的气隙磁场畸变，而使磁极下平均气隙磁通密度 $B_{\delta N}$ 降至 $B'_{\delta N}$，如图 4.7-12 所示。假设曲线 BGD 为抛物线，其值为

$$B'_{\delta N}=(\overline{AB}+4\overline{KG}+\overline{JD})/6 \tag{4.7-29}$$

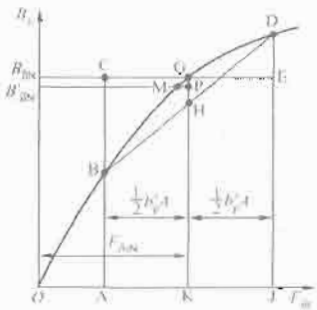


图 4.7-12 交轴电枢反应去磁磁动势

为使电机在额定负载时能达到与空载时相同的平均气隙磁通密度和气隙磁通，应适当增加励磁磁动势以补偿交轴电枢反应的去磁作用。

交轴电枢反应的每极去磁磁动势 F_{adN}（A）可按下式计算

$$F_{adN}=\frac{1}{6}\frac{\overline{BC}-\overline{ED}}{\overline{BC}+\overline{ED}}b'_pA \tag{4.7-30}$$

也可用作图法求取，在图 4.7-12 中连接 $\overline{BD}$，交 $\overline{KG}$ 线于 H 点，取 $\overline{PG}=\overline{HG}/3$，过 P 点作水平线，交曲线 BGD 于 M，则交轴电枢反应的每极去磁磁动势为

$$F_{adN}=\overline{PM}$$

上述计算法或作图法所使用的 $B_\delta=f(F_\delta)$ 曲线可近似地用空载特性曲线（磁化曲线）$\Phi=f(F)$ 代替。

4.3 励磁绕组

除串励电动机外，一般直流电机主要用并（他）励绕组产生主磁场；有些直流电机带有少匝串励绕组，以调节电压或转速调整率。为了使电动机在额定负载时的转速不高于空载转速，并（他）励电动机往往带有称为稳定绕组的少匝串励绕组，以补偿负载时的电枢反应去磁磁动势。

额定运行状态下的每极励磁磁动势为

$$F_f+F_s=F_N+F_{adN}$$

式中，F_f 为每极并（他）励绕组磁动势，A；F_s 为每极串励绕组磁动势（无串励绕组时 $F_s=0$），A；F_N 为对应于额定磁通 Φ_N 所需的每极励磁磁动势，A；F_{adN} 为每极交轴电枢反应去磁磁动势（有补偿绕组，且补偿度为 100%时，$F_{adN}=0$），A。

不同励磁方式时各励磁绕组的磁动势分配见表 4.7-7。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 4.7-7 各励磁绕组的磁动势分配表

励磁方式	他（并）励		复 励	串 励	
串励绕组磁动势	$F_s=0$	$F_s\approx F_{sN}$	$F_s>F_{sN}$	$F_s=F_N+F_{sN}$	$F_s=0.9(F_N+F_{sN})$
他(并)励绕组磁动势	$F_f=F_N+F_{sN}$	$F_f=F_N+F_{sN}-F_s$	$F_f=F_N+F_{sN}-F_s$	$F_f=0$	$F_f=0.1(F_N+F_{sN})$
说明	纯他（并）励	电动机带串励稳定绕组	调整 F_s 值，达到规定的电压或转速调整率	纯串励	带少量起稳定作用的并励绕组

4.3.1 并(他)励绕组

并(他)励绕组的导线截面积

$$A_f=2\rho l_{mf}F_f\rho K_e/U_{fN} \tag{4.7-31}$$

式中，A_f 为并(他)励绕组的导线截面积，mm^2；l_{mf} 为并(他)励线圈平均匝长，m；ρ 为励磁线圈导线电阻率，$\Omega\cdot mm^2/m$。铜导线时 $\rho_{75℃}=0.0217$，$\rho_{115℃}=0.0245$；K_e 为励磁裕量，电动机时 $K_e=1.05\sim1.15$，发电机时 $K_e=1.2\sim1.3$；U_{fN} 为额定励磁电压，V。

并(他)励绕组的额定励磁电流为

$$I_{fN}=A_fJ_f \tag{4.7-32}$$

式中，I_{fN} 为并（他）励绕组额定励磁电流，A；J_f 为励磁线圈电流密度，A/mm^2，见表 4.7-8。

并（他）励绕组的线圈结构参见本篇第 8 章，每极匝数为

$$N_f=K_eF_f/I_{fN} \tag{4.7-33}$$

4.3.2 串励绕组

导线截面积

$$A_s=I_a/J_s \tag{4.7-34}$$

线圈结构参见本篇第 8 章，每极匝数

$$N_s=F_s/I_a \tag{4.7-35}$$

式中，A_s 为串励线圈导线截面积，mm^2；J_s 为串励线圈电流密度，见表 4.7-8。

表 4.7-8 电流密度的选用范围 单位：A/mm^2

绕组种类	电流密度	备 注	绕组种类	电流密度	备 注	绕组种类	电流密度
并(他)励绕组	2.0～4.0	多层线圈	换向极或串励绕组	3.0～5.5	多层线圈	补偿绕组	4.0～7.5
	2.5～5.0	单层线圈		3.5～6.0	单层线圈		

注 各种绕组的电流密度直接与绕组的温升有关，应根据绝缘等级、通风和运行方式、线圈结构等在上表所列范围内选择。在软焊接时，绕组与连接片或换向器升高片的接触电流密度为 0.38～0.5A/mm²。

5 换向参数和换向极、补偿绕组

5.1 换向参数

换向过程基本概念及换向的工程计算参阅第 4 章。在采用常用计量单位进行计算时，对相关公式作了相应修正。

5.1.1 电抗电动势

同槽各换向元件平均电抗电动势的平均值 e_r 是重要的换向指标，可按下式计算。一般，中大型电机限定 $e_r\leqslant7\sim8V$，小型电机 $e_r\leqslant10\sim15V$。

$$e_r=0.2N_a v_a l_a\Lambda\xi \tag{4.7-36}$$

式中，ξ 为表征换向元件平均比漏磁导平均值大小的系数，H/m。

$$\xi=0.4\pi\left[\frac{k_\beta}{2\beta_i}(\lambda_s+\lambda_i)\frac{K_{Fem}(l_a-n_vb_v)}{l_a}+\lambda_e\frac{l_e}{l_a}\right]\times10^{-6} \tag{4.7-37}$$

式中，l_e 为半匝电枢线圈的端部长度，mm；k_β 为与 u、ε_k 和 β_i 有关的系数（u、ε_k 和 β_i 参见本篇第 4 章 2.1.1 节）：

对于同槽式绕组

$$k_\beta=2\left[1+\frac{2}{u\beta_i}\sum_{n=1}^{i}(u-n)(\beta_i-n)\right]+\frac{2}{u\beta_i}\left[u(\beta_i-|\varepsilon_k|)_1+\sum_{n=1}^{i}(u-n)(\beta_i-|\varepsilon_k-n|)+\sum_{n=1}^{i}(u-n)(\beta_i-|\varepsilon_k+n|)\right] \tag{4.7-38}$$

式中，$(\beta_i-|\varepsilon_k|)_1$ 表示该项只取正值，负值则不计；$\sum^{i}$ 表示只取正值项为止，负值项不计。

对于异槽式绕组

$$\begin{aligned}k_\beta=&\frac{2}{u\beta}\Big\{u\beta_i+2\Big[\sum_{n=1}^{i}(u_a-n)(\beta_i-n)+\sum_{n=1}^{i}(u_b-n)(\beta_i-n)\Big]+\\&\sum_{n=1}^{a_a}\Big\{(\beta_i-n)_1+\Big[\beta_i-(n+1)\Big]_1+\cdots+\Big[\beta_i-(n+u_b-1)\Big]_1\Big\}+\\&\sum_{n=1}^{a_b}\Big\{(\beta_i-n)_1+\Big[\beta_i-(n+1)\Big]_1+\cdots+\Big[\beta_i-(n+u_a-1)\Big]_1\Big\}+\\&u_a\sum_{n=0}^{u_b}(\beta_i-|\varepsilon_a-n|)_1+\sum_{n=1}^{i}(u_a-n)(\beta_i-|\varepsilon_b+n|)+\\&\sum_{n=1}^{i}(u_a-n)(\beta_i-|\varepsilon_a-u_b-n|)+\\&u_b\sum_{n=0}^{u_b}(\beta_i-|\varepsilon_b-n|)_1+\sum_{n=1}^{i}(u_b-n)(\beta_i-|\varepsilon_b+n|)+\\&\sum_{n=1}^{i}(u_b-n)(\beta_i-|\varepsilon_b-u_a-n|)\Big\}\end{aligned} \tag{4.7-39}$$

式中，u_a 为同槽短跨距的元件数；u_b 为同槽长跨距的元件数；$u_b=u-u_a$；$\varepsilon_a=u[Q/(2p)-y_a]$；$\varepsilon_b=u-\varepsilon_a=u[y_b-Q/(2p)]$；$y_a$ 为短跨距元件所在槽之间相隔的槽数；y_b 为长跨矩元件所在槽之间相隔的槽数。

对于某些常用的异槽式绕组，其 k_β 值可用表 4.7-9 所示的简化式计算。

表 4.7-9 常用异槽式绕组的 k_β 值

u	ε_k	β_i	k_β
2	0	$\geqslant1$	$8-4/\beta_i$
3	0.5	$2<\beta<2.5$	$11.33-10/\beta_i$
		$\geqslant2.5$	$12-35/(3\beta_i)$
4	0	$2<\beta<3$	$14-14/\beta_i$
		$\geqslant3$	$16-20/\beta_i$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式（4.7-37）中系数 $k_\beta/(2\beta_i)$，可在计算 k_β 值后求得，对于常用的同槽式绕组，也可按 β_i 直接从图 4.7-13 查得其值。

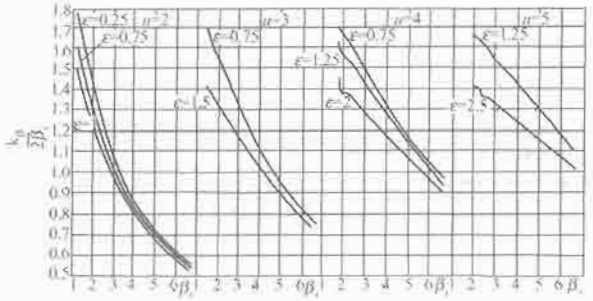


图 4.7-13 $k_\beta/(2\beta_i)$ 与 β_i 的关系

电枢绕组槽部、齿顶和端部比漏磁导 λ_s、λ_t、λ_e 分别按下式计算：

电枢槽比漏磁导：

梨形槽

$$\lambda_s = \frac{h_0}{b_0} + \frac{h_1}{3(r_0 + r_s)} + 0.623 \qquad (4.7\text{-}40)$$

矩形槽

$$\lambda_s = \frac{h_1}{3b_s} + \frac{h_2}{b_s} \qquad (4.7\text{-}41)$$

电枢齿顶比漏磁导：

大型电机

$$\lambda_t = \frac{t_s - b_s}{2\delta_{k1}} + 0.3 \qquad (4.7\text{-}42)$$

有换向极中小型电机

$$\lambda_t = 0.15\frac{b_{pk}}{K_{\delta k1}\delta_{k1}} \qquad (4.7\text{-}43)$$

无换向极梨形槽小型电机

$$\lambda_t = 0.73\lg\frac{\pi t_s}{b_0} \qquad (4.7\text{-}44)$$

式中，δ_{k1} 为换向极第一气隙，mm；b_{pk} 如图 4.7-14 所示；$K_{\delta k1}$ 为换向极第一气隙系数，见式（4.7-46）。

绕组端部比漏磁导 λ_e 可在表 4.7-10 查得。

表 4.7-10 电枢绕组端部比漏磁导系数 λ_e

绕组型式		波、叠绕组	蛙绕组
不同电枢绑扎材料的 λ_e 值	磁性材料	0.75	0.5
	非磁性材料	0.5	0.375

5.1.2 换向区

换向区宽度 $b_k = \left[b_b + c_1 + \left(u + \varepsilon_k - \frac{a}{p}\right)t_k\right]\frac{D_a}{D_k} + b_{sk}$，mm。参见第 4 章 1.3 节。

不计 b_{sk} 的换向区宽度与中性区宽度之比：中小型电机 $<0.6\sim0.7$，大型电机 $<0.5\sim0.6$。

5.1.3 片间电压

工程上通常只核算平均片间电压 $U_{kav}=2pU/K$，参见第 4 章 1.4 节。一般，控制 U_{kav} 不超过：无补偿电机 15～18V，有补偿电机 20～22V，大功率轧钢电机 17～20V。

5.1.4 换向极气隙磁通密度

表示补偿交轴电枢反应电动势和电抗电动势所需换向极气隙磁通密度的式（4.4-25），可改写为

$$B_k = \xi A\frac{l_a}{l_{pk}}\times10^{-4} + \frac{1.25}{1-\alpha_i}A\frac{l_a - l_{pk}}{l_{pk}} + \frac{a\Delta U\times10^3}{2pN_s v_a l_{pk}\beta_i} \qquad (4.7\text{-}45)$$

式中，B_k 为换向极气隙磁通密度，T；l_{pk} 为换向极极靴长度，mm，如图 4.7-14（b）所示。如果换向极数仅为主极数的一半，l_{pk} 应改为 $l_{pk}/2$；ΔU 为超越换向时前后电刷边电压降之差，石墨电刷时取 0.75V，铜石墨电刷时取 0.25V；波绕组只有正负两刷杆时，元件匝数 N_s 还应再乘以 p_a。

式（4.7-45）等号后第一项用来抵消电抗电动势，第二项用来抵消 $l_{pk}<l_a$ 而未被补偿的交轴电枢反应在换向元件中产生的电动势，第三项用来产生略为超前的换向所需的电动势。

5.2 换向极

5.2.1 换向极铁心

换向极铁心一般有如图 4.2-14 所示的形状。一般按下式选取换向极极靴宽度 b_{pk}（mm）：

对中小型电机 $b_{pk} = (0.6\sim0.8)b_k$

对大型电机 $b_{pk} = (0.4\sim0.65)b_k$

或 $b_{pk} = b_k - (2\sim3)\delta_k$

换向极极靴长度 l_{pk} 一般等于 l_a（mm）。

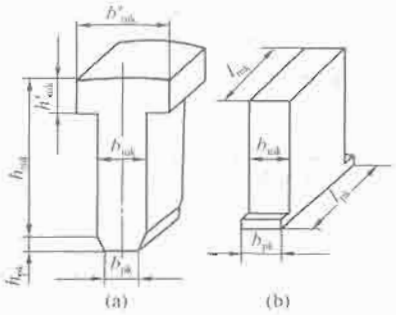


图 4.7-14 换向极铁心形状
（a）大中型电机；（b）中小型电机

5.2.2 换向极气隙与极身磁通密度

换向极第一气隙 δ_{k1} 一般为：

中小型电机 $\delta_{k1} = (1.5\sim2.2)\delta$

大型电机 $\delta_{k1} = (3\sim4)\delta$

换向极气隙系数

$$K_{\delta k1} = \frac{t_a}{t_a - \frac{b_s^2}{5\delta_{k1} + b_s}} \qquad (4.7\text{-}46)$$

上式适用于矩形电枢槽。梨形槽时，只要用 b_0 代替式中的 b_s 即可算出换向极气隙系数。

额定负载时换向极每极气隙磁通和磁通密度为

$$\Phi_k = B_k l_{pk} b_k \times 10^{-6} \qquad (4.7\text{-}47)$$

$$\Phi_{mk} = \Phi_k + \Phi_{\sigma k} = \left(1 + \frac{\Phi_{\sigma k}}{\Phi_k}\right)\Phi_k = \sigma_k\Phi_k \qquad (4.7\text{-}48)$$

$$B_{mk} = \frac{\Phi_{mk}\times10^6}{K_{Fe}b_{mk}l_{mk}} \qquad (4.7\text{-}49)$$

式中，Φ_k 为换向极每极气隙磁通，Wb；Φ_{mk} 和 B_{mk} 分别为换向极极身磁通 Wb 和磁通密度 T；$\Phi_{\sigma k}$ 为换向极漏磁通，Wb；σ_k 为换向极漏磁系数，一般无补偿绕组电机 $\sigma_k=2.5\sim3.5$，有补偿绕组电机 $\sigma_k=1.5\sim3.0$；K_{Fe} 为铁心叠压系数，实心结构时 $K_{Fe}=1$；b_{mk}、l_{mk} 为换向极极身宽度和长度，mm。

过载时

$$B_{mkmax} = B_{mk}\frac{I_{max}}{I_N} \qquad (4.7\text{-}50)$$

式中，B_{mkmax} 为换向极身最大磁通密度，T，一般不得超过 1.4T；I_{max} 为最大负载电流，A。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

5.2.3 换向极绕组

通过电枢电流的换向极绕组产生换向极磁场，从而在电枢换向元件中感生换向电动势（参见本篇第4章），换向极绕组（有补偿绕组时加上补偿绕组）的磁动势，一般应为1.05～1.25倍交轴电枢反应磁动势。

为了产生适当的磁动势，换向极绕组的每极匝数应为

$$N_k = N_1 + N_2 + N_{ti} - N_c \tag{4.7-51}$$

式中，N_c为每极补偿绕组匝数，无补偿时$N_c=0$；N_1为产生换向极第一气隙（δ_{k1}）磁通所需的匝数；N_2为产生换向极第二气隙（δ_{k2}）磁通所需要的匝数，无第二气隙时$N_2=0$；N_{ti}为抵消交轴电枢反应所需匝数。

$$N_1 = \frac{1.1\times 0.8B_k\delta_{k1}K_{\delta k1}a_k\times 10^3}{I_a} \tag{4.7-52}$$

$$N_{ti} = (Z-2p\beta_i N_a)\frac{\dfrac{K}{2p}-|\varepsilon_k|}{4aK} \tag{4.7-53}$$

调整N_1或N_1+N_2的值应使换向极绕组的每极匝数N_k凑成整数或整数+0.5。

此时换向极第二气隙δ_{k2}（mm），应为

$$\delta_{k2} = \frac{N_2 I_a\times 10^{-3}}{0.8B_k\sigma_k a_k}\frac{b'_{mk}}{b_k} \tag{4.7-54}$$

式中，a_k为换向极绕组并联支路数；b'_{mk}如图4.7-14（a）所示。

换向极绕组电流密度J_k（A/mm²），参见表4.7-8，导线截面$A_k=I_a/J_k$（mm²）。线圈结构参见本篇第8章。

5.3 补偿绕组

为更加有效地抵消电枢反应，大中型电机把换向极绕组中抵消主极下电枢反应所需的匝数分散布置在主极极靴上，组成补偿绕组。补偿绕组内电枢电流的方向应与主极极靴下电枢绕组元件内的电流方向相反。

5.3.1 补偿槽数

补偿槽一般均匀地分布在主极极靴上。选择每极补偿槽数Q_c应使其槽节距与电枢槽的槽节距至少相差10%，也不能是电枢槽节距的整数倍，以避免产生额外的振动与噪声。

5.3.2 补偿度

有补偿绕组的电机的补偿度X_c一般在80%～105%范围内。X_c低于100%的称为欠补偿，高于100%的称为过补偿。

为补偿主极下电枢磁动势，所需要的每极补偿绕组磁动势和每极补偿导体数分别为

$$F_c = b_p A$$

$$Z'_c = \frac{b_p A a_c}{I_a} \tag{4.7-55}$$

式中，F_c为每极补偿绕组磁动势，A；Z'_c为每极补偿导体数的初步值；a_c为补偿绕组并联支路数。

在每极补偿槽数为Q_c时，要求补偿绕组每槽有效导体数的初步值为：$z'_c=Z'_c/Q_c$。实际选取的每槽有效导体数z_c（$=2N_c$）为接近z'_c的整数，则每极实际有效补偿导体数Z_c为

$$Z_c = Q_c z_c \tag{4.7-56}$$

补偿度X_c不仅与Z_c/Z'_c之的比值有关，还与补偿槽在极靴上的位置有关。当极尖到最边沿补偿槽的中心线的距离t'_c不等于补偿槽节距t_c的一半（见图4.7-11），即$t'_c\neq t_c/2$时，补偿度X_c为

$$X_c = \frac{Z_c}{Z'_c}\left[1-\frac{2\left(t'_c-\dfrac{t_c}{2}\right)}{b_p}\right]\times 100\% \tag{4.7-57}$$

补偿绕组电流密度J_c，A/mm²，参见表4.7-6，导线截面$A_c=I_a/J_c$，mm²。结构参见本篇第8章。

5.3.3 补偿绕组的偏位分布

补偿绕组通常在主极极靴上对主极铁心中心线对称分布。为达到某种性能要求，有时也采用对中心线不对称分布的布置方式，称为补偿绕组的偏位分布。

一般把直流电动机的换向调整为超越换向，此时电动机电枢绕组换向元件中的电流所产生的磁动势有去磁作用（参见本篇第4章1.2.3节）。假设换向电流按抛物线变化，其每极去磁磁动势约为

$$F'_{ad} = \frac{b_k A}{6} \tag{4.7-58}$$

对于要求精密调节转速的单方向旋转的直流电动机（例如轧钢厂连轧机用电动机），为使电动机特性不受换向电流影响，可采用补偿绕组偏位分布的措施，将补偿绕组的分布中心线逆电动机的旋转方向对主极中心线偏移距离α（mm）。为了留有调节裕量，偏位所增加的磁动势只抵消$0.8F'_{ad}$，即

$$\alpha = 0.067b_k \tag{4.7-59}$$

其余的$0.2F'_{ad}$由设置在主极铁心上的调节绕组进行调节。

调节绕组的接线如图4.7-15所示。

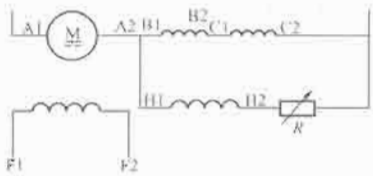


图4.7-15 带调节绕组的直流电动机接线图
A1、A2—电枢绕组；B1、B2—换向极绕组；
C1、C2—补偿绕组；F1、F2—他励绕组；
H1、H2—调节绕组；R—变阻器

6 损耗和效率

6.1 铜损耗

6.1.1 电枢回路铜损耗

$$P_{Cua} = I_a^2(R_a+R_c+R_k+R_c) \tag{4.7-60}$$

式中，P_{Cua}为电枢回路铜损耗，W；R_a、R_c、R_k和R_c分别为电枢、串励、换向、补偿绕组在75℃（B级绝缘）或115℃（F级绝缘）或125℃（H级绝缘）时的电阻，Ω。

6.1.2 励磁回路铜损耗

$$P_{Cuf} = U_f I_f \tag{4.7-61}$$

式中，P_{Cuf}为励磁回路铜损耗（包括调节电阻损耗），W；U_f为额定励磁电压，V；I_f为额定励磁电流，A。

6.1.3 总铜损耗

$$P_{Cu} = P_{Cua} + P_{Cuf} \tag{4.7-62}$$

式中，P_{Cu}为总铜损耗，W。

6.2 铁损耗

6.2.1 电枢齿部、轭部的磁滞和涡流损耗

$$P_{Fet} = K_{Fet}P_{10/50}\left(\frac{pn}{3000}\right)^{1.3}(B_{t\frac{1}{2}})^2G_{Fet} \tag{4.7-63}$$

$$P_{Feja} = K_{Feja}P_{10/50}\left(\frac{pn}{3000}\right)^{1.3}(B_{ja})^2G_{Feja} \tag{4.7-64}$$

式中，P_{Fet}为电枢齿部磁滞和涡流损耗，W；P_{Feja}为电枢轭部磁滞和涡流损耗，W；$P_{10/50}$为磁通密度为1T、频率为50Hz时硅钢片的比损耗；K_{Fet}、K_{Feja}为考虑加工及磁通分布不均匀等影响的经验系数，$K_{Fet}=1.7\sim2$；$K_{Feja}=1.3\sim1.5$。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

6.2.2 主极表面损耗

电枢旋转时，电枢槽口引起主极表面磁通密度脉动，其振幅与气隙及槽口大小有关，脉振频率则与转速及槽数有关。脉振磁通密度如图 4.7-16 所示，其辐值为

$$B_0 = \beta K_{\delta 1} B_\delta \qquad (4.7\text{-}65)$$

式中，B_0 为脉振磁通密度辐值，T；β 为脉振系数，如图 4.7-17 所示。

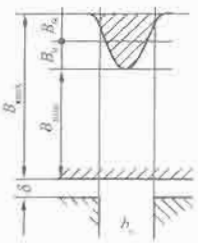


图 4.7-16 脉振磁通密度

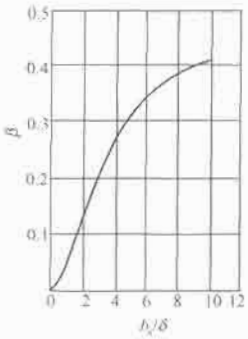


图 4.7-17 脉振系数

$$P_{Fep} = K_0 \left(\frac{Q_n}{10000}\right)^{1.5} (B_0 t_n)^2 A_p \times 10^{-2} \qquad (4.7\text{-}66)$$

式中，P_{Fep} 为叠片主极的表面损耗，W；$A_p = 2p b_p l_p K_{Fem}$ 为极靴表面总面积，mm^2；t_n 为电枢齿距，mm；K_0 为系数，主极材料为 1mm 钢板时 $K_0 = 2.8$，为 1.5mm 钢板时 $K_0 = 4$。

6.2.3 总铁损耗

$$P_{Fe} = P_{Fets} + P_{Fejs} + P_{Fep} \qquad (4.7\text{-}67)$$

式中，P_{Fe} 为总铁损耗，W。

6.3 电刷接触损耗

$$P_b = \Delta U_b I_a \qquad (4.7\text{-}68)$$

式中，P_b 为电刷接触损耗，W。

6.4 机械损耗

6.4.1 电刷摩擦损耗

$$P_{bf} = 0.098 K_f p_{bp} A_b v_k \qquad (4.7\text{-}69)$$

式中，P_{bf} 为电刷摩擦损耗，W；K_f 为电刷摩擦系数，查电刷性能表，一般为 0.2～0.3；p_{bp} 为电刷压力，一般为 15～35kPa；A_b 为电刷接触面积，mm^2；v_k 为换向器圆周速度，m/s。

6.4.2 轴承摩擦与通风损耗

轴承摩擦损耗与轴承承受的压力、摩擦系数和轴颈的圆周速度有关；通风损耗与风扇型式和尺寸以及电枢直径、长度、圆周速度和电机结构型式有关。可分别从图 4.7-18 或图 4.7-19 查得其轴承摩擦与通风损耗 P_{fw}（W）。

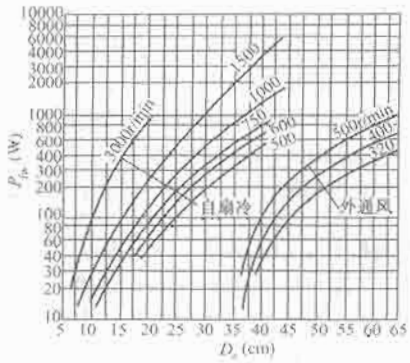


图 4.7-18 中小型直流电机滚动轴承与通风摩擦损耗

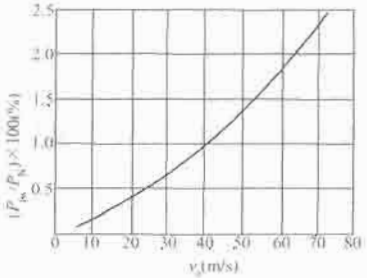


图 4.7-19 中大型直流电机滑动轴承与通风摩擦损耗

6.4.3 总机械损耗

$$P_{bfw} = P_{bf} + P_{fw} \qquad (4.7\text{-}70)$$

式中，P_{bfw} 为总机械损耗，W。

6.5 杂散损耗

根据国家标准 GB755《旋转电机 定额和性能》规定，在额定功率时的杂散损耗 P_s 为：

无补偿绕组电机 $P_s = 0.01 P_N$ (4.7-71)

有补偿绕组电机 $P_s = 0.005 P_N$ (4.7-72)

式中，P_s 为杂散损耗，W。

6.6 总损耗和效率

$$\Sigma P = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{bfw} + P_s \qquad (4.7\text{-}73)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P}\right) \times 100\% \qquad (4.7\text{-}74)$$

式中，ΣP 为总损耗，W；η 为效率。

效率在作为考核的性能指标时是指 η_N，即所有损耗应是额定工作条件下的数值，其中计算铜耗的电阻应是 75℃（B 级绝缘）或 115℃（F 级绝缘）时的电阻值。

7 工作特性计算

直流电动机在不同负载下的工作特性可按表 4.7-11 计算。

表 4.7-11 直流电动机工作特性计算表

名 称	单位	公 式	不同负载的数值						备 注
电枢电流 I_a	A								
电枢电动势 E_a	V	$E_a = U_N - (I_a \Sigma R + \Delta U_b)$							
电枢反应去磁电流 I_f'	A	$I_f' = \frac{F_{aq}}{N_f} \frac{I_a}{I_{aN}}$							电枢反应去磁安匝折算到并励绕组的励磁电流

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

名 称	单位	公 式	不同负载的数值						备 注
有效励磁电流 I_f'	A	$I_f'=I_f-I_f''+I_aN_s/N_f$ 串励电机 $I_f'=I_a-I_f''$							I_f 为额定励磁电流值
负载时等效电动势 E_a'	V								转速为 n_N 时空载特性曲线上对应 I_f' 的电动势
转速 n	r/min	$n=\frac{E_a'}{E_a}n_N$							
输出功率 P_2	W	$P_2=P_1-\sum P$							$\sum P$ 为电机总损耗
输出转矩 T_2	N·m	$T_2=9.8P_2/n$							
输入功率 P_1	W	$P_1=U_N(I_a+I_f)$							并励、复励
		$P_1=U_NI_a$							他励
		$P_1=U_NI_a$							串励
输入电流 I_1	A	$I_1=I_a+I_f$							并励、复励
		$I_1=I_a$							他励、串励
效率 η	%	$\eta=(P_2/P_1)\times100=\left(1-\frac{\sum P}{P_2+\sum P}\right)\times100$							

8 发热和通风冷却

8.1 热平衡方程和发热曲线

为简化分析，将电机假设为温度均匀的发热体。

在任一时间内热平衡微分方程为

$$Q_h\mathrm{d}t=cG\,\mathrm{d}\theta+\alpha_sA\theta\mathrm{d}t \tag{4.7-75}$$

解得任一时间内的温升为

$$\theta=\theta_\infty(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}})+\theta_0\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}} \tag{4.7-76}$$

$$T=\frac{Gc}{\alpha_sA_{t1}} \tag{4.7-77}$$

式中，Q_h 为单位时间内产生的热量，W；c 为质量热容，J/(kg·K)；G 为质量，kg；α_s 为表面传热系数，W/(m²·K)；A_{t1} 为传热表面的面积，m²；θ 为温升，K；θ_∞ 为稳定温升，K；θ_0 为起始温升，K；T 为发热时间常数。

θ 与 t 的关系如图4.7-20所示曲线1。当起始温升 $\theta_0=0$ 时，式(4.7-76)简化为 $\theta=\theta_\infty(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}})$，其 θ 与 t 的关系则为图4.7-21所示曲线2。

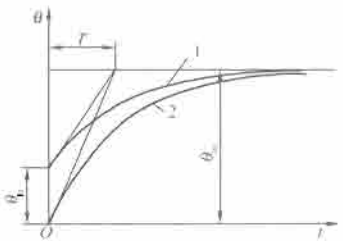


图4.7-20 均质固体发热曲线

8.2 热的传导和表面散热

由绕组铜损耗转变的热量，一部分直接由绕组表面散热，另一部分与铁损耗转变的热量一起，在铁心表面及铁心通风孔散热。

传导的热量 Q_h 与温差 K 的关系可用下式表示

$$\theta=\frac{Q_hl}{\lambda A_{t2}} \tag{4.7-78}$$

式中，l 为热传导经过的长度，m；A_{t2} 为热传导经过的面积，m²；λ 为导热系数，见表4.7-12。

表4.7-12 电机常用材料的导热系数

单位：W/(m·K)

材 料	λ	材 料	λ
紫铜	350	云母带	0.24
铝	200	层压板	0.4
钢	63	浸漆玻璃丝带	0.22
涂漆硅钢片	1.2	静止薄空气	0.025

绝缘材料的 λ 值范围多数在0.2左右，电机的绝缘在保证耐压的条件下应尽量做得薄些。静止薄空气层导热系数极小，应尽量消除绕组绝缘内的空气层。金属的导热系数尽管比绝缘材料的大数百倍，但热传导经过的长度比绝缘厚度大得多，应考虑金属中也有一定的温度降。

以辐射和对流方式由表面向空气散发热量时，表面对空气的温差可用下式表示

$$\theta=\frac{Q_h}{\alpha_sA_{t1}} \tag{4.7-79}$$

式中，传热系数 α_s 随表面空气速度的增加而增加，且与传热面的性质有关。

为此采用各种有效的通风方式，使电机得到良好的冷却。

8.3 温升计算

在实际电机中，由于各部分发热不均匀，热量流动和热阻不易确定，按式(4.7-78)和式(4.7-79)计算的温升不易准确。可以根据经验，按各部位的单位面积损耗来估算温升。也可根据电机的负载性质、防护型式和通风方式，控制一些与发热有关的电磁参数，如线负荷、电流密度和磁通密度等，使电机各部分的温升在允许值内，而不做详细的温升计算。

8.4 通风冷却

通风冷却计算的目的是确定电机所需的冷却风量，和保

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

证该风量的压力。

8.4.1 风量计算

风量计算是指计算电机在额定状态下运行、温升达到稳定值时，带走电机总损耗产生的热量所需的风量。因此，风量可按下式计算

$$Q = k\frac{\sum P}{c_n\theta} \tag{4.7-80}$$

式中，Q 为风量，m^3/s；$\sum P$ 为电机总损耗，W；c_n 为空气的体积热容比，在50℃大气压为 1.01×10^5 Pa 时，$c_n=1100$ J/(m^3·K)；θ 为电机进出口的冷却空气的温差，K，通常控制在电枢绕组温升的1/4以内；k 为考虑各部分热量及空气不均匀的系数，一般取1.3。

8.4.2 风压计算

电机风路中的风压和风量的关系如下

$$H = ZQ^2 \tag{4.7-81}$$

式中，H 为风压，Pa；Z 为风阻，可根据风道的结构、形状及风道的表面状态等因数，分别算出各部分的风阻，然后用类似电路中电阻的串、并联，求得整台电机风路的风阻。

用式(4.7-81)算出对应每个风量的风压，得到电机的风阻特性，如图4.7-21所示。

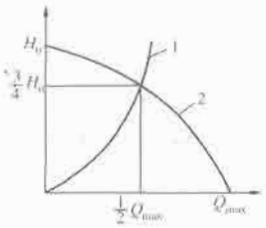


图4.7-21 风扇、风阻特性

1—风阻特性；2—风扇特性

由于电机风路的风阻计算较为复杂，其结果也不很精确，可按下列经验公式计算风压

$$H = 13.5\left(\frac{3.3\times10^3}{D_0^2}Q^2 + 10\right) \tag{4.7-82}$$

式中，D_0 为电枢直径，mm。

图4.7-21中，离心式风扇特性曲线2与电机风阻特性曲线1的交点，显示电机运行时的风压 H 与风量 Q，Q 的值应满足式(4.7-80)。

8.4.3 离心风扇设计

中小型自扇冷式直流电机一般采用径向离心式风扇，如图4.7-22所示。

图4.7-22中离心式风扇的主要尺寸 D_1、D_2、b 和片数 m，可按下列经验公式计算

$$D_1 = (1.05\sim1.15)D_a \tag{4.7-83}$$

$$D_2 = (0.8\sim0.85)D_0 \tag{4.7-84}$$

$$b = \frac{3Q}{D_2^2 n_N}\times10^5 \tag{4.7-85}$$

$$m = \pi\frac{D_2+D_1}{D_2-D_1} \tag{4.7-86}$$

式中，D_1、D_2 为内、外直径，mm；b 为叶片宽度，mm；$D_0=D_j-2h_j$ 为机座轭内径，mm；m 为叶片数，按上式取整数。

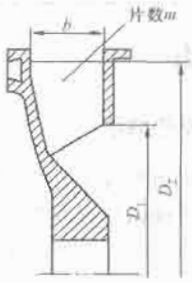


图4.7-22 离心式风扇的主要尺寸

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第8章 结构设计

结构设计时应考虑下列主要问题：

1）强度和刚度。电机的零部件，特别是轴、电枢支架、换向器等旋转部件，应有足够的强度和刚度，使其在技术条件所规定的各种运行工况以及最高转速所引起的离心力作用下，能安全可靠地工作，并使机械振动、噪声和无线电干扰减少到最小程度。

2）工艺性。在满足电机的运行性能和技术要求的条件下，力求结构简单，便于制造、运输、维护和检修。

3）结构合理性。电机结构（包括绝缘结构和通风风路）合理，在电磁负载、热应力和机械应力的综合作用下，电机能长期可靠地工作，各部件的温升不超过规定的限值，从而保证足够的使用寿命。

4）零部件的标准化、通用化程度高，互换性好。

1 结构型式、防护等级、冷却方法和线端标志

参见本卷第1篇第2章。

2 定子

定子是构成磁路和风路的静止部件，主要由机座、主极、换向极、有补偿电机的补偿绕组等组成，如图4.8-1所示。中小型直流电机的定子大多采用多边形，以提高定子内部空间利用率，如图4.8-2所示。中心高小于或等于180mm的小型直流电机，定子采用定子磁轭、主极和换向极冲片是一体的冲片，如图4.8-3所示。

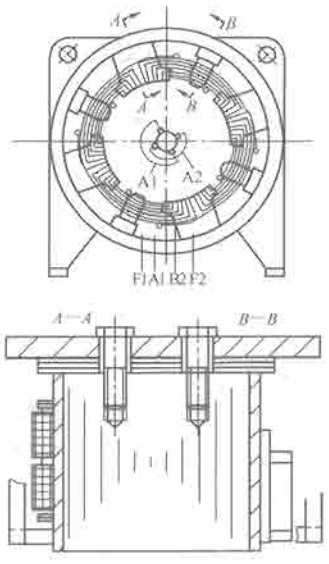


图4.8-1 直流电机定子

对定子的基本要求是：

1）主极、换向极的极性正确。发电机的换向极极性应与沿电枢旋转方向即将进入的主极极性相同，而电动机则相反，如图4.8-4所示。一般情况下，电刷被安放在主极中心线附近的换向器表面上。电刷的极性与电枢绕组型式和电机旋转方向的关系见表4.8-1。

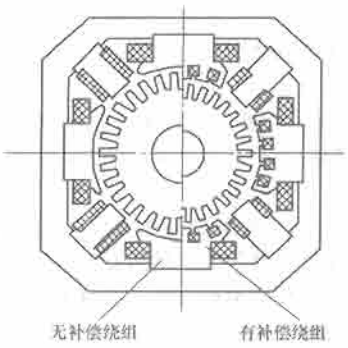


图4.8-2 多边形定子



图4.8-3 多边形整体磁轭定子



图4.8-4 主极和换向极的极性排列

表4.8-1 电刷的极性

绕组型式	从换向器端看主极下的电刷极性			
	电枢顺时针旋转		电枢逆时针旋转	
	N极	S极	N极	S极
叠绕（开口）	−	+	+	−
叠绕（交叉）	+	−	−	+
波绕（开口）	−	+	+	−
波绕（交叉）	+	−	−	+

注 蛙绕组按其叠绕组型式决定电刷极性。

2）定子绕组各线圈间的连接正确。绕组单路连接时，对电流较大的串励绕组、换向极绕组和补偿绕组，应隔极相连，以免线圈间连接线内的电流形成产生轴电压的励磁磁动势。双路连接的各种绕组也应隔极相连，以防止由于两路电流分配不均而造成各对极的磁动势不等。

3）磁极、线圈、连接线等零部件牢固可靠，在冲击负载和磁场突变时，不致产生有害的变形或松动。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4）导电零件连接处的接触电阻小，对地绝缘性能良好。

5）定子各绕组及连接线布置紧凑、合理，有利于通风散热。

2.1 机座

机座是磁路的组成部分，也是固定主极、换向极、端盖（罩）等零部件的支撑件，以往为铸钢件或由钢板焊接而成。近年来由于静止整流供电电源的普遍应用，为适应负载经常快速变化和提高磁路动态响应性能，普遍采用叠片机座。对机座的基本要求是：

1）具有足够的刚度。在自重、磁极铁心和绕组的重量以及电磁转矩和磁拉力等的作用下，不产生有害的变形和振动。

2）加工、运输、安装和检修方便。用钢板焊接的机座圈，不能因焊缝位置引起主极磁路的不对称；叠片机座应保证每对主极下扇形片接缝数相等；分半机座的合缝面位置，要考虑安装和维修方便。

3）机座中心高及底脚孔距离等安装尺寸应符合有关标准。

4）充分利用机座内部空间，使定子内各绕组通风散热良好。

常用的机座结构参见本卷第 1 篇第 4 章。

2.2 主极

主极由主极铁心、主极线圈、极身绝缘、绝缘垫圈（板）和紧固零部件等组成。图 4.8-5 是常用的大中型直流电机的主极结构。

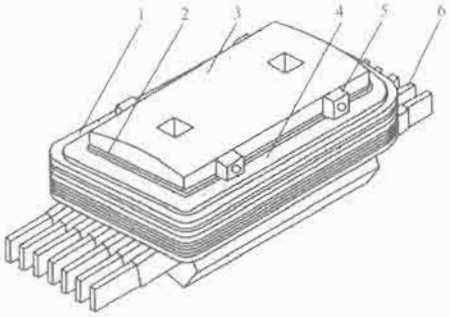


图 4.8-5 直流电机主极结构图

1—主极线圈；2—极身绝缘；3—主极铁心；4—绝缘垫板；5—压块；6—补偿线圈

主极冲片通常用 1～2mm 厚的钢板冲制，表面绝缘或不绝缘，叠压后用铆焊或螺栓等方法紧固成主极铁心。他（并）励线圈和小型电机的串励线圈一般按绝缘等级的要求选用相应绝缘等级的电磁线绕制。他（并）励线圈可单独绕制，绝缘后套在包好极身绝缘的主极铁心上；或绕在绝缘框架外，套装在主极铁心上；也可直接绕在包好极身绝缘的主极铁心上。电流在 70A 以上的串励线圈和大型直流电机的他励线圈通常用裸线平绕或扁绕而成。

用螺栓固定到机座上的主极应均匀分布在机座上，以免出现磁路不对称。叠片机座有时在机座冲片相应位置冲出缺口，便于主极、换向极固定时定位，如图 4.8-6 所示。

大型直流电机固定主极的螺栓大于 M48 时，往往在主极铁心内穿入铁杆，以避免叠片铁心攻螺纹困难和螺纹强度不够。铁杆上用于固定磁极螺栓的螺孔可在穿入铁心前预先钻攻，也可在主极铁心叠压后钻攻。有些负载繁重的中小型直流电机，有时也采用这种结构。



图 4.8-6 叠片机座主极、换向极的固定

1—螺栓；2—叠片机座；3—主极垫片；4—主极；5—换向极；6—换向极垫片

对于极身顶部为圆形的主极冲片，其半径应为定子轭内孔半径加 2～3mm，以增加主极铁心固定后的稳定度。

2.3 换向极

换向极由换向极铁心、换向极线圈、极身绝缘和线圈固定件等组成。

换向极铁心有整体式和叠片式两种结构。对特别细长的叠片式换向极铁心，为提高其刚度和整体性，可在铁心叠压和紧固后作真空浸渍处理。

换向极线圈一般用电磁线或裸铜扁线绕制，裸扁线线圈如图 4.8-7 所示。在大型直流电机中为了压缩换向极线圈所占的定子空间和使线圈接近电枢表面以减少漏磁，换向极线圈有时采用扁铜带焊成矩形线圈，再用横穿换向极铁心的螺栓固定在换向极铁心上，如图 4.8-8 所示。

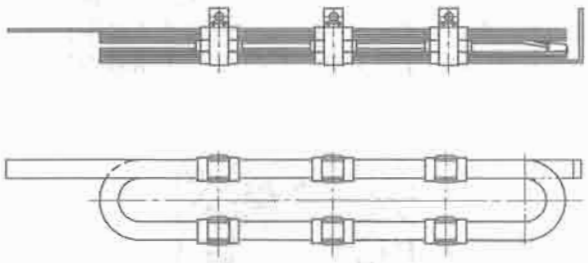


图 4.8-7 换向极线圈结构

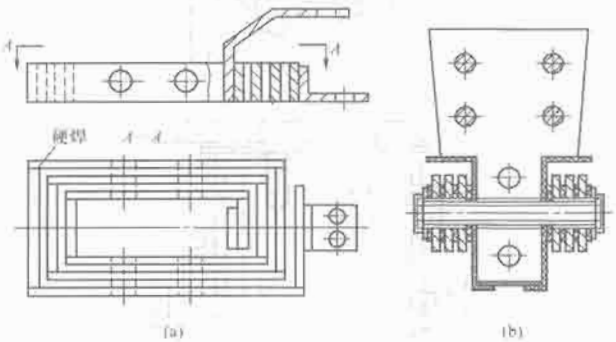


图 4.8-8 矩形换向极线圈及其固定结构

（a）矩形换向极线圈；（b）矩形换向极线圈固定结构

2.4 补偿绕组

2.4.1 补偿线圈

补偿线圈的基本结构型式有同心式和条式两种，如图 4.8-9 所示。

同心式补偿线圈由圆或扁铜电磁线绕制，用于半闭口或

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

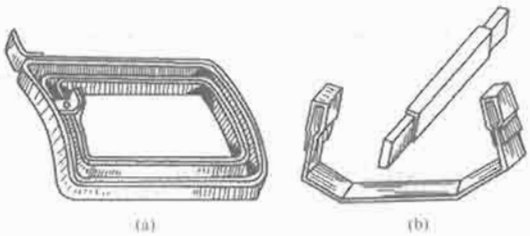


图 4.8-9 补偿线圈结构型式
(a) 同心式(扁铜电磁线绕制);(b) 条式

开口补偿槽的中小型电机。条式补偿线圈分直线和端线两部分，由裸铜母线制成，用于半闭口或闭口补偿槽的大中型电机，嵌线时需将外包绝缘的直线部分穿入主极补偿槽内，然后用端线连接成绕组。当补偿槽是开口槽时，为减少补偿齿、槽引起的磁脉动的影响，常采用磁性槽楔。

2.4.2 补偿线圈的连接与端部固定

补偿线圈，特别是条式补偿线圈直线和端线部分的连接常采用如图 4.8-10 所示的三种方式。连接方式应根据电机的结构尺寸和使用要求进行选择，螺栓连接方式拆装方便，但为了满足工艺上的需要，间距 t 不能太小；并头套软焊结构工艺简单，但耐温低；硬焊连接方式耐温高、机械强度高，最可靠。

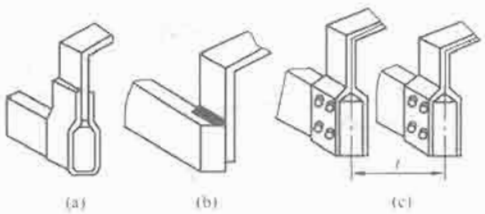


图 4.8-10 补偿线圈连接方式
(a) 并头套软焊;(b) 硬焊;(c) 螺栓连接图

为防止补偿绕组在电磁力作用下发生移动，补偿线圈在槽内的直线部分一般采用槽楔固定。补偿槽是开口槽时，为了减少补偿齿、槽引起的磁脉动的影响常采用磁性槽楔。补偿槽是闭口槽时，也可不用槽楔，靠装配好的主极整体真空浸渍处理，使线圈和铁心成为一体。补偿绕组端部相互间一般用绝缘垫块隔开，并用玻璃丝绳绑扎或用螺栓压紧。大型直流电机补偿绕组连接线部分有时还用螺栓通过支架固定在机座内圆上，如图 4.8-11 所示。

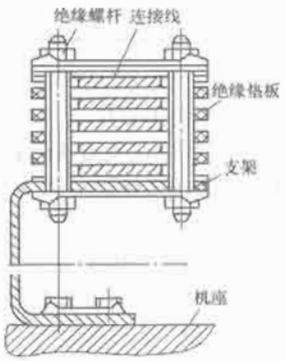


图 4.8-11 补偿绕组端线部分的固定

2.5 定子引出线与连接线

当电流较小时定子引出线与线圈极间连接线采用电缆，当电流较大时采用铜母线。电缆的最大载流量与电机的工作制、冷却方法、结构和防护型式有关。B 级绝缘电缆的最大载流量见表 4.8-2。

表 4.8-2 B 级绝缘电缆最大载流量

电缆铜导体截面积 (mm^2)	电缆的最大载流量 (A)			
	连续工作制		短时工作制	
	开启或防滴式	封闭式	开启或防滴式	封闭式
1	10			
1.5	15			
2.5	26	23	39	30
4	40	33	60	46
6	58	47	87	68
10	84	67	140	110
16	120	100	220	170
25	160	140	320	255
35	200	175	430	350
50	255	220	580	470
70	310	270	760	620
95	375	315	960	790
120	425	350	1140	940

注 下级绝缘电缆最大载流量约为表中数值的 1.15 倍。

2.6 换向极垫片

换向极垫片用来调整换向极气隙，有磁性和非磁性两种。

磁路采用全叠片结构后，在磁性钢板冲制的换向极垫片中，涡流的阻尼作用上升为阻碍换向极磁通跟随电枢电流快速变化的主要矛盾，常用的改进措施是在换向极垫片上冲一些窄槽，增加涡流路径的长度，增大涡流回路的电阻，以抑制垫片中的涡流。非磁性垫片用非磁性钢板或环氧玻璃布板冲制，用作换向极第二气隙，以减少换向极漏磁。

3 电枢

电枢由电枢铁心、电枢绕组、换向器和轴等主要部件组成。图 4.8-12 为一般中小型直流电机的电枢。

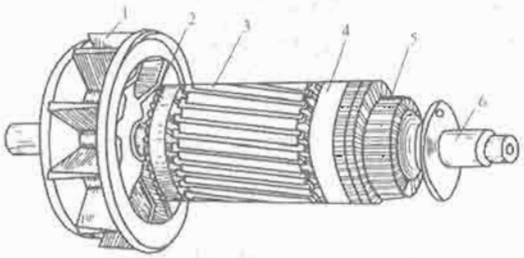


图 4.8-12 中小型直流电机的电枢
1—风扇;2—绕组;3—电枢铁心;
4—绑带;5—换向器;6—轴

电枢结构不仅应满足电磁性能的要求，而且应保证它在交变电磁转矩和离心力的作用下，各组成部分结构的牢固可靠，通风风路合理。对功率较大的电机，当电枢直径受到飞轮力矩 GD^2 等限制时，可采用双电枢结构。

3.1 电枢铁心

电枢铁心是由两面刷漆的 0.5mm 硅钢片冲制的电枢冲片叠装而成。中小型电机的铁心大多采用平键、热套、滚花冷压等方式直接装在轴上，铁心上设有轴向通风孔。大中型电机一般将电枢冲片装在电枢支架上，然后用键或热套的方

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

法将支架与轴固定。

长铁心常常分成若干段，段间设有径向通风沟。

3.1.1 电枢冲片及其固定

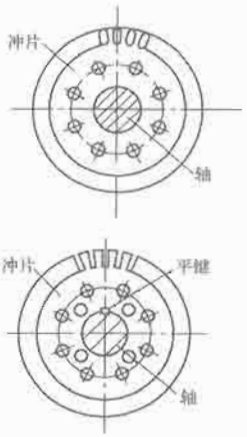
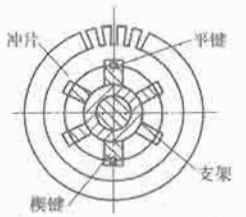
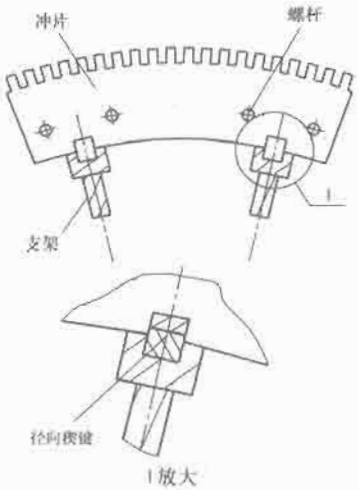
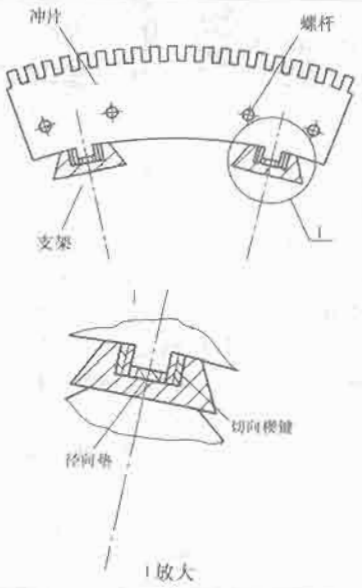
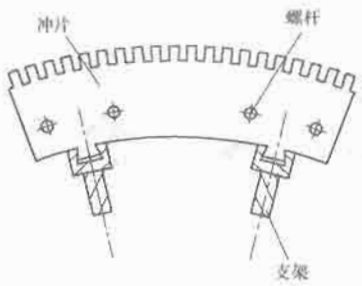
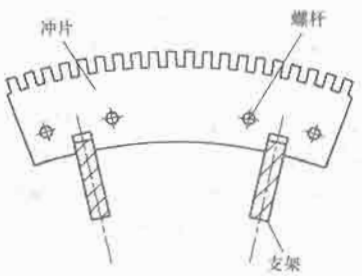
电枢冲片有整圆和扇形两种。最大的整圆冲片外径取决于硅钢片的宽度，一般不大于990mm。当硅钢片供货宽度大于1000mm时，整圆冲片的外径可相应增大。

整圆冲片上冲有梨形槽或矩形槽，前者适用于电枢线圈为圆线散嵌的小型电机，后者适用于电枢线圈用扁铜线制成的电机。带矩形槽的扇形冲片用于大型电机，为传递转矩和铁心叠片时定位，每张扇形片上至少带有1～2个鸽尾槽（筋）和相应数量的螺栓孔。

常用的电枢铁心冲片及其固定方式见表4.8-3。

表4.8-3 常用电枢铁心冲片及其固定方式

续表

冲片类别	固定方式	结构简图	应用
整圆	热套、平键、滚花冷压		冲片与轴用热套、平键、滚花冷压固定，适用于小型直流电机
	平键和楔键		冲片与支架用平键和楔键固定，适用于中型可逆转电动机
扇形片	径向楔键		冲片与支架用径向楔键固定，适用于大型发电机与不逆转的一般电动机
扇形片	切向楔键和径向垫		冲片与支架用切向楔键和径向垫固定，适用于大型轧钢电机
扇形片	外鸽尾筋		冲片与支架用带鸽尾槽的筋固定，适用于可逆转大型轧钢电机
扇形片	内鸽尾筋		冲片与支架用带鸽尾筋的支架筋固定，冲片材料利用率高，通风冷却条件好，适用于大型直流电机

3.1.2 扇形片

扇形片应按以下基本要求分片：

1）电枢冲片的分片数应避免造成磁路不对称而引起的轴电压，每对磁极下叠片的接缝数 q_1 应为整数，即

$$q_1 = S_1 / p = \text{整数}$$

式中，S_1 为每周扇形片数；p 为电机主极对数。

2）扇形片内外弦长之和，或外弦长尽量接近硅钢片宽度，以利于合理套裁。

3）拉紧螺栓孔应均匀分布，孔数为电枢支架筋数的整倍数，孔距一般为120～160mm。

4）每张扇形片的槽数最好是整数，并且接缝处是半槽，以免折断齿。为避免出现半齿，每张扇形片的槽数带1/2时，往往采用两种不同整数槽的扇形片（如每扇形片为$26\frac{1}{2}$槽时，一种扇形片用26槽，另一种用27槽）。但这样要用两种冲模，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

增加了制造费用和叠片工艺的复杂性（在使用数控冲槽机冲片并叠装成斜槽电枢铁心时，不受此约束）。

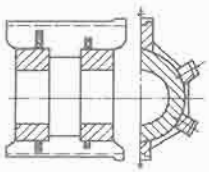
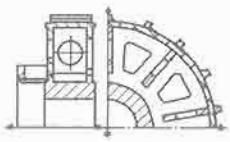
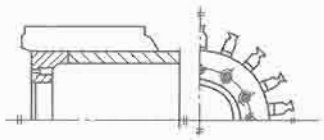
为减少电动机在极低转速下的转速、转矩脉动，降低噪声，往往采用斜槽电枢铁心结构。在整圆冲片时，用轴上铣斜键槽叠装，或外压装的铁心在套轴前扭斜来达到斜槽的目的。在扇形冲片情况下，可通过数控冲槽机使相邻层扇形冲片上的齿槽位置按规律平移一微小距离，并对扇形片按层按序编号，再严格按编号叠装出斜槽电枢铁心。

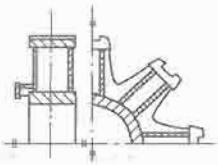
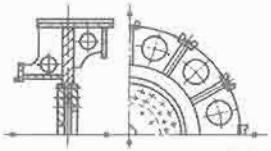
3.2 电枢支架

电枢支架是大中型电机电枢铁心的支撑件，能减轻电枢重量并有利于电枢的通风冷却。常用电枢支架结构见表4.8-4。

电枢支架与轴一般通过键或热套紧配合。某些大型直流电动机电枢采用整体浸渍工艺时，由于受浸渍设备的限制，常常在电枢嵌线并整浸后才能套轴。为避免热套轴过程中铁心过热损伤绝缘，在加热电枢铁心使支架内孔扩大的同时，冷冻转轴使其外径缩小，以保证热套间隙而不致加热过高，为消除套轴过程中产生的轴向应力，常采用高压油打入轴和支架间的空腔以扩大电枢支架内孔的方法消除其内应力。

表4.8-4 常用电枢支架结构

型　式	星形支架	箱式支架	空心轴支架
结构简图			
特征	支架由铸铁、铸钢或钢板焊接而成	支架为焊接结构，轮毂用锻钢，幅板外圆用圆筒连接，以增强支架刚度	支架为焊接结构，鸽尾筋与空心轴体直接焊接
适用范围	中型直流电机	大型直流电机	大型直流电机

型　式	盒形支架	夹板式支架
结构简图		
特征	支架为焊接结构，整体轮毂，盒形支架臂，可较好地传递力矩，抗振，防止开焊和断裂，通风良好	支架为焊接结构，由主幅板、副幅板及筋焊接而成
适用范围	大型直流电机	矿井卷扬用悬挂式大型直流电动机

3.3 轴

轴除了要传动转矩、承受电枢全部质量和单向磁拉力外，还要承受轴伸传来的弯矩、轴向推力及扭转振动时所产生的交变或放大力矩等，是转动部分的关键部件。

对转轴的要求，它的常用结构和材料参见本卷第1篇第4章2.1节。

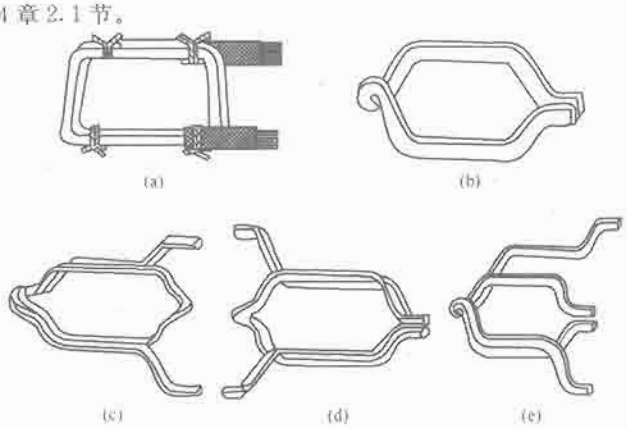


图4.8-13 电枢线圈结构

(a) 散嵌线圈；(b) 单匝叠绕成型线圈；(c) 多匝波绕成型线圈；(d) 单鼻蛙绕线圈；(e) 双鼻蛙绕线圈

3.4 电枢绕组

电枢绕组的分类、参数、特征和应用参见本篇第5章。组成绕组的各式线圈的典型结构如图4.8-13所示。

在某些电磁参数高的大型直流电机中，为统筹解决换向和发热问题，电枢线圈采用变截面半线圈式结构，即上、下层半线圈的直线部分的导线截面与端线部分的导线截面不同，如图4.8-14所示。这样利用线圈各部位散热条件不同，即使各部位截面电流密度不同也不会导致局部过热，电枢槽高度尺寸则明显减少，对电机的换向性能极为有利。



图4.8-14 变截面电枢线圈

3.5 均压线

均压线的分类、参数和应用参见本篇第5章。均压线结构如图4.8-15所示。其中人字形均压线广泛使用于大中小型电机的叠绕组中；环式均压线一般使用在复波绕组中；渐开线式均压线是将换向器升高片分成两根渐开线导线，分别

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

与电枢绕组的等电位点相连，升高片兼起均压线的作用，用于大型高速电机的叠绕组中，作为全额甲种均压线，在特殊情况下，也与穿过铁心的丙种均压线结合在一起使用。

接在电枢一端的均压线可装在换向器端并与换向片或升高片连接；也可安装在非换向器端，借并头套与线圈鼻端或引线相连，如图 4.8-16 所示。接在换向器端的均压线均压效果好，但注意防止炭粉积累引起的短路故障；接在非换向器端的均压线安装结构较为复杂，但便于修理；穿过铁心的均压线的安装如图 4.8-17 所示，其结构和安装都较为复杂。

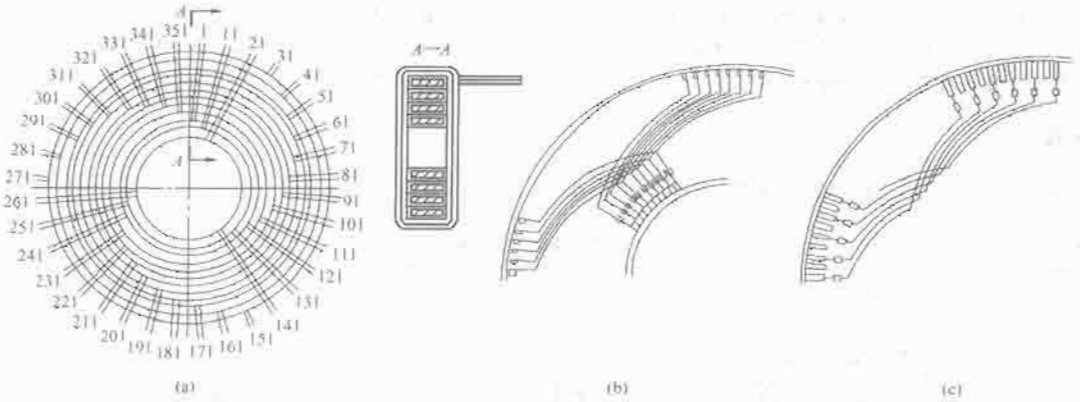


图 4.8-15 均压线的结构型式
(a) 环式；(b) 渐开线式；(c) 人字式

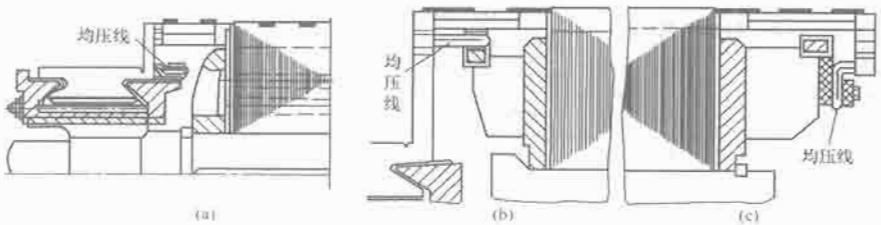


图 4.8-16 接在电枢一端的均压线安装结构
(a) 均压线在换向器端；(b) 均压线在换向器端；(c) 均压线在非换向器端

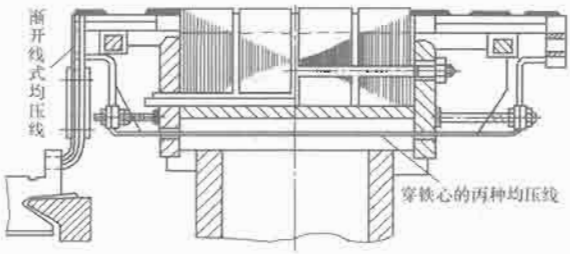


图 4.8-17 穿过铁心的均压线的安装结构

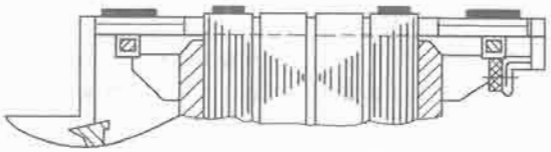


图 4.8-18 电枢无纬带绑扎

3.6 电枢绕组的固定和温度测量

电枢绕组的直线部分通常用槽楔固定在电枢铁心槽内，端线部分通过绑扎无纬玻璃丝带固定在线圈支架上，槽楔的厚度和绑扎的宽度与厚度取决于所受离心力的大小、槽楔与无纬带的材质以及电机的实际结构情况。端部绑扎带一般不应高出铁心外径。对于大型高速电机，无纬带绑扎厚度超过10mm时，应分几次绑扎成型，达到要求的厚度，以避免绑扎开裂。

为改善换向或提高极限容量，有些电机取消槽楔，改用在铁心上绑扎无纬带固定绕组直线部分，以减少电枢槽高，降低换向电抗电动势。此时，铁心上的绑扎带往往高出铁心，在拆装电枢过程中，应注意避免绑扎带直接受力而损伤绑扎带和电枢绕组。

电枢无纬带绑扎如图 4.8-18 所示。

电枢绕组端部和铁心部位绑扎无纬带应力计算按下列公式

$$\sigma_d = \sigma_1 + \sigma_0 \tag{4.8-1}$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_0 \tag{4.8-2}$$

$$\sigma_1 = 0.8722 \frac{G_d D_d}{W_1 bd} \left(\frac{n_p}{1000}\right)^2 \tag{4.8-3}$$

$$\sigma_2 = 0.8722 \frac{G_t D_a}{W_2 bd} \left(\frac{n_p}{1000}\right)^2 \tag{4.8-4}$$

$$\sigma_0 = 0.387 D_a^2 \left(\frac{n_p}{1000}\right)^2 \times 10^{-5} \tag{4.8-5}$$

式中，σ_d 为电枢绕组端部无纬带总应力，MPa；σ_t 为电枢绕组铁心部位无纬带总应力，MPa；σ_1 为电枢绕组端部无纬带应力，MPa；σ_2 为电枢绕组铁心部位无纬带应力，MPa；σ_0 为无纬带自身重量产生的应力，MPa；G_t 为铁心部位电枢绕组质量，N；G_d 为电枢端部电枢绕组质量，N；b 为无纬带宽度，mm；d 为无纬带厚度，mm；D_a 为电枢外径，mm；D_d 为电枢绕组端部平均直径，mm；n_p 为电枢飞逸转速，r/min；W_1 为电枢绕组端部绑扎无纬带匝数；W_2 为电枢绕组铁心部位绑扎无纬带匝数。

无纬带的绝缘耐热等级必须与电枢的绝缘耐热等级相匹配。无纬带的许用应力一般小于或等于 200MPa。

大中型直流电机的电枢绕组根据使用要求，通过埋置的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

电阻测温元件在运行中测量其温度。温度信号可用无接触的无线电发射，或通过滑动接触的集电环和电刷，从转动中的电枢传输到静止的接收装置进行测量。因此，事先应根据不同的测量原理在电枢上安装相应的装置。

无线电无接触电枢绕组测温装置易遭受电磁场的干扰，为保证测量精度而采用的线路、屏蔽措施和安装维护都比较复杂。

集电环和电刷接触式电枢绕组测温装置已得到广泛应用。为排除滑动接触电阻对测量精度的影响，在电枢上的测温元件与集电环之间加装电阻—频率变换器，使电阻测温元件随温度变化而变化的电阻转变成频率，通过集电环和电刷传送到静止的测温装置上，经过解调频率得出应得的温度。

3.7 换向器

换向器既要传导电流，又要承受离心力和热应力的作用，要求：有足够强度、刚度和片间压力；在起动、制动或过速运转的情况下，保持其形状稳定，不产生不允许的变形和温升；换向片之间和对地要有良好绝缘性能和足够的爬电距离；工作表面光滑平整，具有较高的耐磨性和耐电弧性。

3.7.1 结构型式

换向器的结构型式主要取决于电机的功率、电压和转速。常见的换向器有塑料换向器、拱形换向器、绑环换向器等。

1）塑料换向器。结构简单，加工方便，适合批量生产，主要用于小型直流电机。

2）拱形换向器。应用最广泛的换向器，用于大中小各类电机中。

3）绑环换向器。应用于换向器圆周速度超过40m/s的高速直流电机中。

4）插入式绑环换向器，其绑环不影响换向器工作表面，通风散热良好，兼备拱形和绑环换向器两者的优点，可替代拱形换向器应用于一些大中型电机中。

5）捆绑式换向器。应用无纬带绑扎技术，将换向片固定在绝缘后的换向器套筒上，结构简单，加工方便，但对无纬带绑扎工艺要求较高，用于中小型直流电机中。

6）内置紧圈式换向器。采用一次成型工艺，结构紧凑，通风效果良好，直径 $D_k=90\sim600$mm，允许的换向器圆周速度 v_k 可达55m/s。

各类换向器的典型结构如图4.8-19所示。

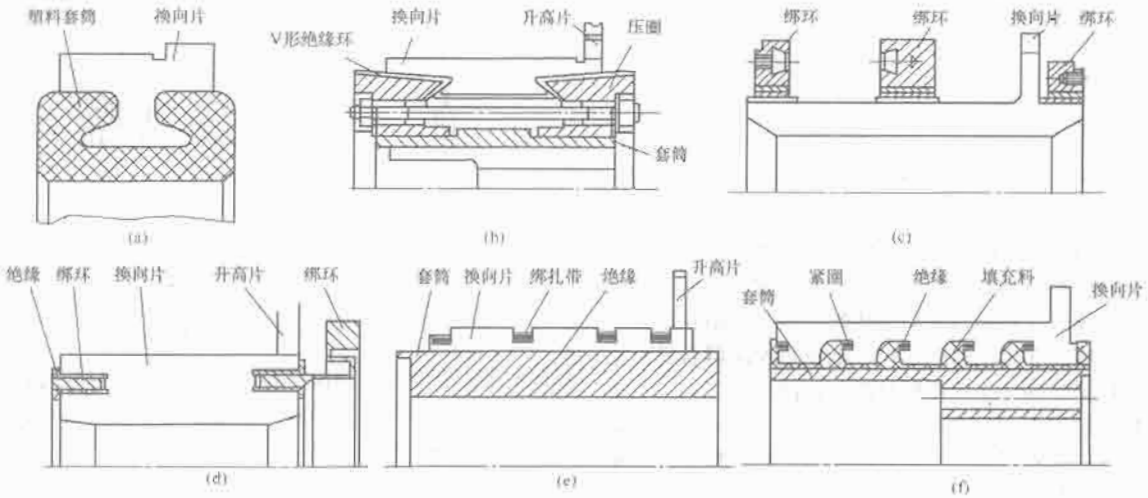


图4.8-19 换向器的典型结构

(a) 塑料换向器；(b) 拱形换向器；(c) 绑环换向器；(d) 插入式绑环换向器；(e) 捆绑式换向器；(f) 内置紧圈式换向器

拱形换向器一般由换向片、片间绝缘、V形绝缘环、压圈、套筒、拉紧螺栓或压紧螺母等组成。塑料换向器是将拱形换向器的V形绝缘环、压圈、套筒、拉紧螺栓等部件改为塑料，还常将拱形换向器的鸽尾形换向片改成工字形等形状，以增加换向器的强度和刚度。

换向器片间绝缘厚度要均匀，具有一定的弹性，在高温高压作用下具有较小的收缩率，老化较慢，其耐热等级应与电机的耐热等级相适应，换向器装配时不应有较多的胶粘剂流出，加工时不裂解，硬度适宜，最好与铜片具有相近的磨损率。

V形绝缘环是换向器片和压圈间的对地绝缘，根据电机耐热等级需要，一般B级绝缘电机中常用虫胶塑型云母板、多元酸塑型云母板或环氧玻璃胚布，F、H级绝缘电机中采用硅有机塑型云母板、聚芳烷基醚-酚上胶玻璃布热压而成。采用环氧玻璃胚布做V形绝缘环时，为提高其耐潮、耐电性，一般应加聚酯薄膜等补强材料。

上述云母制品材料的含胶量要适当。含胶量过多，绝缘环的收缩率太大，厚度不易控制，容易在换向器生产或电机运行过程中产生故障。

3.7.2 主要尺寸

1）换向器直径。取决于电磁设计和电机结构，推荐按GB/T12973《换向器集电环的尺寸》选用。

2）换向器长度。换向器工作表面的长度除考虑每个刷杆电刷数和电刷、刷握尺寸外，还应考虑电刷轴向位移（图4.8-26）、运转时电枢的轴向窜动量、换向器端面圆角半径等。

3）换向片高度。决于换向器的直径、长度、磨损量以及电机转速等，由换向器强度计算确定，可按下式估算：

对一般用途电机

$$h=22\sqrt[4]{0.1D_k-1} \tag{4.8-6}$$

对特殊用途电机

$$h=28\sqrt[4]{0.1D_k-1} \tag{4.8-7}$$

式中，h 为换向片高度，mm；D_k 为换向器直径，mm。

换向器容许的径向磨损量（mm）可按下式估算

$$\varepsilon=5\sqrt[4]{0.1D_k} \tag{4.8-8}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3.7.3 换向片

换向片常用冷拉梯形铜排制成。梯形铜排的尺寸要求高于一般铜母线，应给予严格控制。为提高其电导率与耐磨、耐热和耐弧性及机械强度等性能，往往采用含银、铬、镉、锆和稀土等铜合金梯排。各种材料的主要性能见表 4.8-5。

表 4.8-5 换向片材料主要性能

材料类别	硬 铜	银 铜	镉 铜	铬 铜	锆 铜
化学成分的质量分数（%）	含铜 99.9	含银 0.08～0.15	含镉 1	含铬 0.4～0.6	含锆 0.2
抗拉强度（MPa）	340～440	340～440	490	440～490	390～440
硬度 HBS	80～110	95～110	100～115	110～130	120～130
电导率（%）IACS①	98	96	85	80～85	90
高温强度（MPa）	200℃时 200～250	290℃时 250～260		400℃时 210	400℃时 340

① IACS是国际退火工业纯铜标准的简称，1913年国际电工学会规定，退火工业纯铜在20℃时的电阻率为 0.01724Ω·mm²/m 为标准电导率，以100%IACS表示。

为保证换向器在磨损或外圆加工后，换向片之间仍然有足够的片间压力，换向片梯形铜排两侧面之间的夹角必须比计算值小 20″～30″，绝不允许大于计算值；换向片梯排的大头尺寸必须是负公差。换向片梯排大头尺寸 a（mm）和高度 h（mm）的允许容差见表 4.8-6。

表 4.8-6 换向片梯排尺寸 a 和 h 容差 单位：mm

a	容 差	h	容 差
$3<a\leqslant 6$	−0.05	$18<h\leqslant 30$	−0.3
$6<a\leqslant 10$	−0.06	$30<h\leqslant 50$	−0.6
$10<a\leqslant 18$	−0.07	$50<h\leqslant 80$	−0.8
		$80<h\leqslant 150$	−1.0

3.7.4 升高片及其固定

升高片是换向器与电枢绕组的中间连接零件。在小型电机中，电枢直径和换向器直径相差较小时，或为了提高运行的可靠性，将换向片的一端加高来代替升高片，即升高片与换向片为一整体。在大中型电机中，电枢与换向器直径相差较大，必须借助升高片连接电枢绕组与换向片。

升高片一般用 1～2mm 的软铜板或 0.5～1.8mm 韧性好的软钢带制成，前者用于大中型直流电机，后者用于中小型直流电机。常见的升高片结构如图 4.8-20 所示。当升高片较长时，其中部弯成弧形，如图 4.8-20（e）所示，以改善升高片受热后的变形和减少换向片所受的升高片离心力。在有些大型电机中，在发热允许的情况下，用钢材制作升高片，以防止频繁正反转及冲击负载作用下发生升高片断裂。

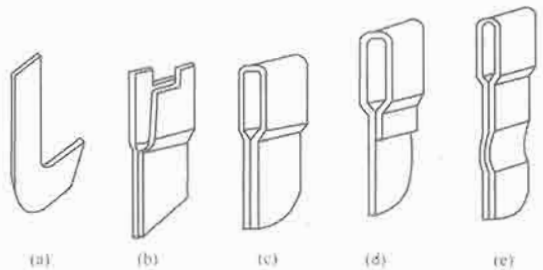


图 4.8-20 升高片结构图

升高片和换向片的连接结构如图 4.8-21 所示，其中钢质升高片与换向片必须用硬钎焊连接。当换向片较薄时，可在换向片侧面铣槽，升高片贴在换向片侧面槽内，再铆接或钎焊。硬钎焊时应注意防止换向片过热退火。

电枢线圈引出线一般放入升高片上部的并头套内，再用软钎焊（B级绝缘电机）或硬钎焊（F级绝缘电机）焊接。

在升高片和换向片为一体的情况下，线圈引线与换向片

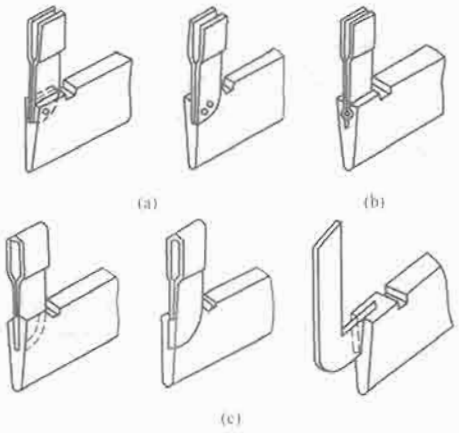


图 4.8-21 升高片与换向片的连接结构
（a）铆接（软钎焊）；（b）轴向销子固定（软钎焊）；（c）硬钎焊

常采用钨极惰性气体保护焊焊接。有些大型电机的升高片上部为平板，则用中频焊或钼极电阻焊与电枢线圈引线搭接或对接，如图 4.8-22 所示。

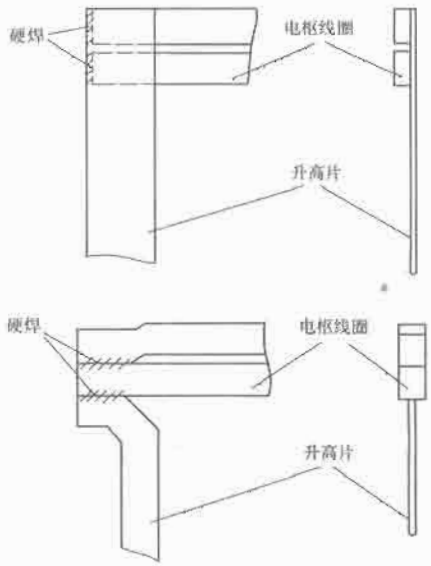


图 4.8-22 升高片与电枢线圈的焊接

大型电机的升高片较长，在正反转或快速加减速时容易引起谐振，导致升高片变形直至折断。为此，需要采取适当措施固定升高片。常用的方法有绑绳固定、绝缘垫圈固定、弹性垫块固定及捆束式固定等。图 4.8-23 为弹性垫块固定

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

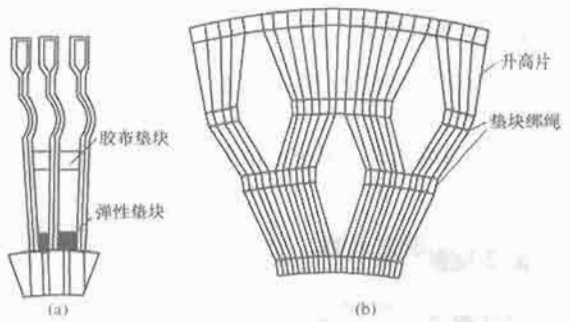


图 4.8-23 升高片固定结构示意图
(a) 弹性垫块固定；(b) 捆束式固定

和捆束式固定的示意图。

弹性垫块固定结构用弹性垫块置于升高片根部，并用环氧树脂涂封，这样对升高片的机械振动产生阻尼作用，从而降低其振幅。捆束式固定结构将升高片分成若干组，用绝缘垫块将升高片相互隔开，并用线绳将升高片捆成若干束，这样可以限制升高片的谐振。

3.7.5 拱形换向器机械计算

拱形换向器机械强度计算所用的主要结构尺寸如图 4.8-24 所示。

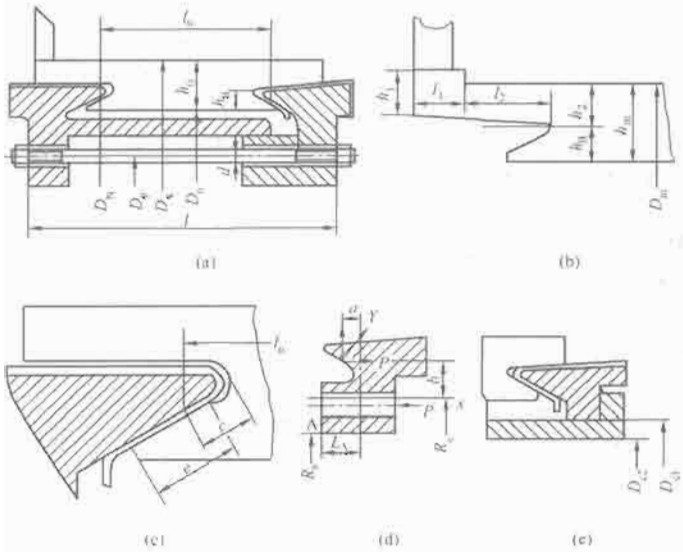


图 4.8-24 拱形换向器主要结构尺寸

拱形换向器主要部位的机械强度和计算公式如下：

1) 换向器片间单位拉力 p（MPa）为

$$p = 6 + 0.5\left(\frac{D_k}{100}\frac{n_{max}}{1000}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{4.8-9}$$

式中，D_k 为换向器外径，mm；n_{max} 为 1.2 倍换向器最高工作转速，r/min。一般情况下 p 约为 8～12.5MPa。

2) 换向器轴向总拉力 P(N)为

$$P = 181pF \tag{4.8-10}$$

式中，F 为换向片侧面积，mm²。

3) 换向器在过速状态下离心力总合与静态径向力总合之比为

$$i = 25\theta\frac{(D_0 + h_0)^2}{p}\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \tag{4.8-11}$$

$$\theta = 1 - \frac{Kt_a}{\pi(D_0 + h_0)} \tag{4.8-12}$$

式中，D_0 为换向器内径，mm；h_0 为换向片高度，mm；θ 为换向器填充系数；K 为换向器片数；t_a 为换向器片间云母厚度，mm。

4) 热态（150℃）过速对常温（20℃）静态下的应力增加系数为

$$\xi = 1.5 + 0.5i \tag{4.8-13}$$

5) 换向器拉紧螺杆拉伸应力 σ_{g1}（MPa）为

$$\sigma_{g1} = \frac{P}{mF_0}\xi \tag{4.8-14}$$

式中，m 为换向器拉紧螺杆数；F_0 为拉紧螺杆最小直径处的截面积，mm²。

6) 换向器拉紧螺杆弯曲应力 σ_{g2}（MPa）为

$$\sigma_{g2} = \frac{D_p L^2 d}{43000 F_0}\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \tag{4.8-15}$$

式中，D_p 为换向器拉紧螺杆分布直径，mm；d 为螺杆直径，mm；L 为螺杆计算长度，mm。

7) 换向器拉紧螺杆合成应力 σ_g（MPa）为

$$\sigma_g = \sigma_{g1} + \sigma_{g2} \leqslant 180 \tag{4.8-16}$$

8) 换向片鸽尾弯曲应力 σ_w（MPa）为

$$\sigma_w = 3.56\frac{(\varepsilon - 0.18h_B)}{\theta(D_0 + h_B)h_B^2}\xi \tag{4.8-17}$$

对于小型直流电机 $\sigma_w \leqslant 180$MPa，大中型直流电机 $\sigma_w \leqslant 160$MPa。h_B（见图 4.8-24）为换向片鸽尾高度，mm。

9) 换向器中部弯曲应力 σ_i（MPa）为

$$\sigma_i = \frac{0.015 l_0^2 p}{\theta(D_m - h_m)h_m}\xi \leqslant 180 \tag{4.8-18}$$

式中，l_0 为换向片计算长度，mm；h_m（见图 4.8-24）为换向片磨损后的高度，mm；D_m 为磨损后换向器的最小外径，mm。

10) 磨损后换向器片端部的应力 σ_0（MPa）为

$$\sigma_0 = \frac{0.06}{h_2^2}[(C_0 + C_1)(0.5l_1 + l_2) + 0.5C_2 l_2]\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \tag{4.8-19}$$

$$C_0 = 35.7\frac{GR}{\theta D_m} \tag{4.8-20}$$

$$C_1 = 5l_1 h_1 D_m \times 10^{-4} \tag{4.8-21}$$

$$C_2 = 5l_2 h_2 D_m \times 10^{-4} \tag{4.8-22}$$

式中，C_0 为升高片离心力，N；G 为升高片质量，kg；R 为升高片重心半径，mm；l_1、l_2、h_1、h_2 为磨损后换向片端部的尺寸，mm（见图 4.8-24）。

11) V 形云母环压应力 σ_N（MPa）为

$$\sigma_N = 0.64\frac{P}{D_N e}\xi \leqslant 70 \tag{4.8-23}$$

式中，e 为 V 形云母环承压宽度，mm。

12) 换向器压圈 A 点的拉伸应力 σ_{p1}（MPa）为

$$\sigma_{p1} = \frac{1.73P}{2\pi F_A}\frac{R_g}{R_a}\xi \leqslant 200 \tag{4.8-24}$$

式中，F_A 为压圈截面积，mm²；R_c 为压圈重心半径，mm；R_a 为压圈最大应力点 A 的半径，mm。

13) 换向器压圈 A 点的弯曲应力 σ_{p2}（MPa）为

$$\sigma_{p2} = \frac{(1.73a + b)PL_A}{2\pi J_y}\frac{R_c}{R_a}\xi \tag{4.8-25}$$

式中，J_y 为压圈截面惯性矩，mm⁴；a、b、L_A（见图 4.8-24）分别为压圈受力点到惯性轴的距离，mm。

14) 压圈的合成应力 σ_p（MPa）为

$$\sigma_p = \sigma_{p1} + \sigma_{p2} \leqslant 300 \tag{4.8-26}$$

15) 当不采用螺杆拉紧，而用大螺母压紧压圈时，式(4.8-14)～式(4.8-16)则不需计算，应按下式计算套筒螺纹处的拉伸应力 σ_m（MPa）为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$\sigma_m = \frac{4P}{\pi(D_{c1}^2 - D_{c2}^2)}\xi \qquad (4.8\text{-}27)$$

式中，D_{c1}为套筒螺纹处直径，mm；D_{c2}为套筒内径，mm。

4 电刷装置

电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座圈等零件组成，如图4.8-25所示，通过固定的电刷和旋转的换向器之间的滑动接触，把外电路与电枢电路连接。中小型电机的刷杆座圈固定在端盖或轴承内盖上，大中型电机的刷杆座则固定在机座上。有些大型电机为了提高刷杆座的结构刚度，常将刷杆座直接固定在底板上。

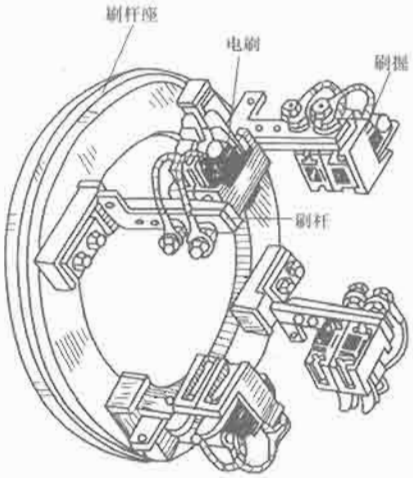


图4.8-25 电刷装置结构

4.1 结构和基本要求

1）具有足够的刚度，在电机正常运行时，不产生有害变形和机械振动。

2）保证电刷与换向器滑动接触良好，刷握沿换向器周向等分。

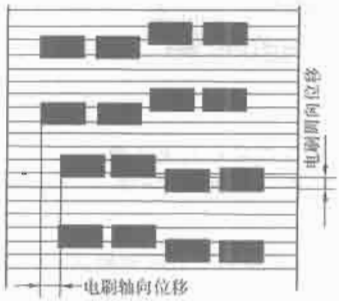


图4.8-26 电刷位移布置示意图

3）便于维护、更换电刷和调节电刷压力。

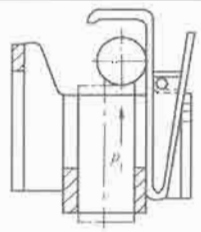
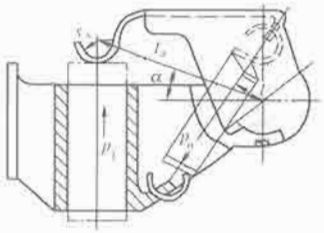
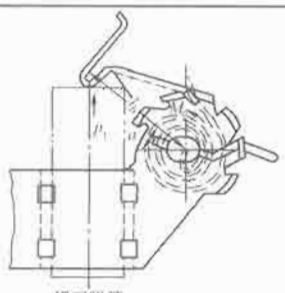
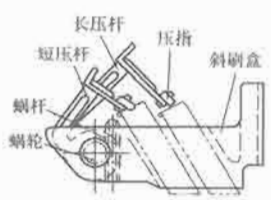
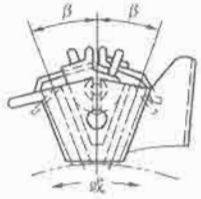
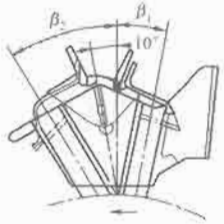
4）电刷在换向器表面布置合理。电刷的轴向位移有利于减少换向器表面因磨损出现的轴向波浪度，轴向位移量至少要大于相邻两电刷的轴向间隙，一般为15mm左右；周向位移可调节电机换向的强弱。电刷位移布置如图4.8-26所示。

4.2 刷握结构

刷握由刷盒、弹簧及压指等零件组成。电刷在刷盒内应能上下自由滑动而不晃动，对换向器外圆表面有良好的跟随性。电刷压力一般为15～25kPa，应力求均匀、在电刷磨损过程中压力能保持大致不变。

刷握结构有直、斜两大类，弹簧可分恒压、蜗卷和螺旋等几种。常用的刷握结构见表4.8-7。

表4.8-7 常用刷握结构

直刷握	简图	 恒压弹簧	 圆柱形弹簧	 蜗形弹簧
	特点	电刷磨损过程中，压力p_1基本保持不变 $p_1 = 7.74\frac{bh^3}{R_n^2}K$ 式中，p_1为压力，kN；b为弹簧宽度，mm；h为弹簧厚度，mm；R_n为弹簧内径，mm；K为系数1～2.2	电刷磨损过程中，压力p_1变化不大，压力可通过微调机构调节 $p_1 = \frac{p_0 l}{l_a \cos\alpha}$ 式中，p_0为弹簧拉力，kN；l为弹簧轴线与压子轴心的距离，mm；l_a为压子作用点与轴心的距离，mm；α为l_a与水平线的夹角	电刷磨损过程中，压力p_1有所变化，压力可调节 $p_1 = \frac{M_0}{l_b \cos\alpha}$ 式中，M_0为蜗形弹簧的力矩，kN·mm；l_b为压子作用点与蜗形弹簧中心的距离，mm；α为l_b与水平线的夹角
	适用范围	正反转中小型直流电机	正反转中小型直流电机	正反转中小型直流电机
斜刷握	简图	 单斜	 旋转方向对称双斜	 不对称双斜
	特点	电刷受力情况较直刷握好，其安装位置是电刷锐角边对着电机旋转方向，常用倾斜角$\beta = 20°$	电刷压力可以调节，常用倾斜角为$\beta = 20°$	电刷压力可以调节，常用倾斜角$\beta_1 = 10°$，$\beta_2 = 30°$其安装位置是电刷30°锐角边对着电机旋转方向
	适用范围	单向旋转的直流电机	正反转大中型直流电机	单向旋转的大中型直流电机

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4.3 常用刷握尺寸规格

常用电刷截面见本篇第7章。

4.4 电刷与刷握的配合

电刷在刷握中上下滑动应灵活，但不允许电刷在刷握中晃动。为此，电刷与刷握间的间隙应符合表4.8-8。

表4.8-8 电刷与刷握的间隙 单位：mm

电刷截面	电刷部位	电刷容差	刷握容差	最大间隙	最小间隙
≤8×8	厚度	−0.05 −0.15	+0.06 0	0.21	0.05
	宽度	−0.07 −0.21	+0.12 0	0.33	0.07
>8×8	厚度	−0.06 −0.20	+0.12 0	0.32	0.06
	宽度	−0.08 −0.25	+0.14 0	0.39	0.08

5 端盖或端罩

端盖或端罩是保护电机内部和构成风路的部件，它的结构取决于电机的防护型式。

许多中小型电机的轴承及叠片机座电机的底脚安排在端盖上，端盖还起着支撑电枢和整个定子的作用。端盖一般用铸铁铸造或用钢板焊接，经止口与机座相配合，并用螺栓固定在一起。

配备座式滑动轴承的大中型电机，采用薄钢板焊接的端罩。对端罩的基本要求是刚度好，焊接、加工和拆装方便，通风效果好和外形美观。端罩上往往设置观察窗和进入电机内部的门，端罩内有时还装设照明装置。

6 轴承

中小型直流电机一般采用滚动轴承，中心高630mm以上的电机根据需要也可采用端盖式滑动轴承；大型电机一般采用座式滑动轴承。详见本卷第1篇第4章。

7 底板

采用座式滑动轴承的大中型直流电机一般应配有底板。底板是承受电机动、静负荷的重要部件，必须有足够的强度、刚度并设有地脚螺栓孔。底板大多用钢板或型钢焊接、加工而成，一般采用整块结构；当宽度超过4～4.5m时，为了运输方便，可分成两半，到安装工地再用螺栓和圆钢连接成整体。大型电机的底板也可采用条状分块式结构，不过安装、调整比较复杂。

底板一般通过二次灌浆与基础连成一体。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第9章 试验、安装和维护

1 试验

电机出厂前必须按GB 755《旋转电机 定额和性能》及各类产品技术条件的规定，按GB 1311《直流电机试验方法》、GB/T 20114《普通电源或整流电源供电直流电机的特殊试验方法》进行各项试验。

1.1 试验项目

试验分检查试验、型式试验和特殊试验三类，各类的试验项目见表4.9-1。

表4.9-1 试验项目

试验项目	检查试验	型式试验	特殊②试验
电刷中性位置的确定	√	√	
绕组对机壳及绕组相互间绝缘电阻的测定	√	√	
绕组在实际冷状态下直流电阻的测定	√	√	
空载特性的测定	√①	√	
额定负载试验（同时检查换向）	√	√	
偶然过电流和短时过转矩试验（同时检查换向）	√	√	
电动机的短时过转矩试验（同时检查换向）	√	√	
发电机固有电压调整率或电动机固有转速调整率的测定	√	√	
超速试验	√	√	
振动测定	√①	√	
匝间冲击耐压试验	√	√	
短时升高电压试验（如已进行匝间冲击耐压试验，可不再进行）	√	√	
耐电压试验	√	√	
温升试验		√	
效率试验		√	
有换向极电机的无火花换向区域的测定③		√	
噪声测定		√	
无线电干扰的测定			√
转动惯量测定			√
轴电压测定			√
电感测定			√
整流电源供电时电机的电压、电流脉动率的测定			√
电枢电流变化率的测定			√
正逆向转差试验	√	√	

注 表中标有"√"者表示应进行试验。

① 可根据需要仅列为型式试验项目。

② 产品有要求时进行。

③ 换向性能的判定和调整参见本篇第4、7章。

1.2 试验方法

1.2.1 振动测定

按GB/T 10068《轴中心高为56mm及以上电机的机械振动 振动的测量评定及限值》进行。

1.2.2 噪声测定

按GB/T 10069.1-3《旋转电机噪声测定方法及限值》进行。

1.2.3 无线电干扰测定

按GB 3907《工业无线电干扰基本测量方法》进行。

1.2.4 电刷中性位置确定

1）感应法。在电机各绕组正确接线情况下，为保证电机运行性能良好，电机的电刷必须放在中性位置上。确定电刷中性位置的方法通常用感应法。测试时，将低量程电压表跨接在沿圆周相邻的刷杆上，在主极绕组上交替接通或断开电机的励磁电流。当电刷位置不在中性位置时，电压表将显示电枢绕组的感应电动势值。反复移动刷杆座圈位置，找出电压表读数为零的一点，即为电刷中性位置。如果有一个区域的电压表读数都接近零，则应找出此区域，该区域的中点即为电刷中性位置。试验时，仪表的读数以断开励磁电流时为准，且通入绕组的励磁电流应小于1/10额定励磁电流。

对于大型电机，由于电枢和刷杆座圈较难移动，试验时可将电刷自换向器上提起，把低量程电压表的引线跨接在等于或接近于一极距的两换向片上，维持跨距不变，同时左右移动电压表两引线，测出不同位置上相应两换向片上的电枢感应电动势，并按图4.9-1用作图法求出中性线，然后移动刷杆座圈，使电刷与换向器接触面中线与此中性线相重合。

2）正反转电动机法。试验时，在保持电枢电压、励磁电流及负载（接近额定值）不变的情况下，逐步移动刷杆座圈位置，在每个位置测量电机正转及反转时的转速，直到两个方向的转速最接近为止，此时即可认为电刷位于中性线上。

1.2.5 空载特性测定

电机按他励空载发电机方式运行，维持额定转速，测量电枢电压与励磁电流的关系。试验时，一般只测量空载特性的下降分支。为避免磁路的磁滞影响，励磁电流的调节必须在单一方向逐渐增加或减少，不可出现"回复"现象，否则应重新开始试验。在测量中，最高电枢电压的量取值，一般应不高于额定电压的130%。

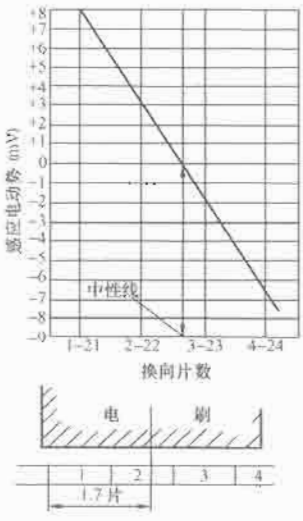


图4.9-1 确定电刷中性线的感应电动势曲线

1.2.6 负载试验

负载试验的目的是考核电机在额定负载及过载

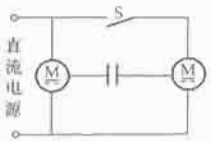
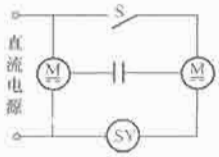
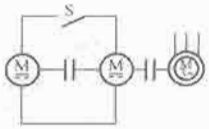
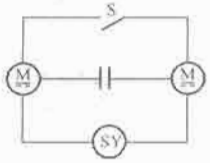
标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

时的特性和换向性能。电机加负载的方法一般采用负载电阻法或回馈法。在某种特殊场合也可采用短路法。

1）负载电阻法。负载电阻法具有调节简便，电机运行稳定等优点，但消耗电量大，只适用于小功率直流电机。对发电机，将发电机输出的电能直接消耗在负载电阻上；对电动机，是将电动机输出的机械能通过一台同轴连接的发电机，把机械能转化成电能，再消耗于负载电阻上。

2）回馈法。回馈法的优点是耗电量小，不需要设置庞大的负载电阻装置，是负载试验中被广泛应用的一种试验方法。常用的回馈法，其接线图和试验要点见表 4.9-2。

表 4.9-2　　常用的回馈法接线图和试验方法要点

名　称	并联回馈法	带升压电机并联回馈	辅助电动机法	带升压电机串联回馈
接线图				
被试电机	电动机或发电机	电动机	电动机或发电机	电动机
试验步骤	1. 起动被试电机并调节至额定转速 2. 调节用作发电机的电压，使其与电源电压相等极性一致 3. 闭合开关 S，使电动机与发电机并联 4. 调节发电机的励磁和电源电压，使电动机的电流、电压、转速等达到额定值	1. 起动被试电动机并调节至额定转速，起动升压机 SY 的原动机 2. 调节发电机发电机和升压机 SY 的励磁，使两者电压相加并与电源电压相等极性一致 3. 闭合开关 S，使电动机与发电机并联 4. 调节 SY 的励磁和电源电压，使被试电动机的电流、电压、转速等达到额定值	1. 起动辅助电动机，并调节至被试电机的额定转速 2. 调节两台电机励磁，使两台电机的电压相等、极性一致 3. 闭合开关 S，使电动机与发电机并联 4. 调节两台电机励磁，使被试电机的电流、电压等达到额定值	1. 电动机和发电机的励磁绕组极性，应保证电枢通电后，两台电机转矩相反 2. 起动升压机的原动机 3. 调节升压机的端电压，并降低发电机的励磁，使被试电动机调节到额定状态
回馈法中损耗	两台电机的全部损耗由直流电源供给	两台电机的空载损耗由电源供给，负载损耗由升压机供给	两台电机的全部损耗由辅助电动机供给	两台电机的全部损耗由升压机供给
注意事项	1. 两台相同规格发电机作上述试验时，为保证被试发电机的额定值，作电动机运行的那台发电机，电枢电流将比额定值大，比值为两台电机效率乘积的倒数 2. 为保证稳定运行，可将励磁电源接成差复励，其串励绕组与被试电机电枢回路串联。也可采用发电机差复励、移刷等措施	1. 此法应用于发电机的电压比被试电机的额定电压略低时 2. 对于相同规格的两台电机作上述试验时，还可测定电机的效率，详见 GB 1311《直流电机试验方法》 3. 升压机的耐压等级应与被试电机一样	1. 若出现发电机的电压比电动机略低时，可串接升压机 2. 若被试电机按铭牌额定转速作负载试验时，上述方法适用被试电机为电动机或发电机 3. 若被试电机转速按额定励磁电压作用下作负载试验时，则此法仅适用于被试电机为发电机	1. 此法主要用于串励电机的回馈试验 2. 不需要与被试电机额定电压一样的电源电压 3. 当发电机失磁时，串励电动机的空载转速不会很高 4. 为保证运行稳定，调节方便，发电机 G 的励磁可为他励

由于直流电机规格繁多，在没有相同规格的电机作回馈试验时，可根据被试电机的铭牌数据按表 4.9-3 来估计出陪试电机的电压和电流。

表 4.9-3　　陪试电机的电压和电流

电　流	电　压
并联回馈 $I' \geqslant \eta' I$，串联回馈 $I' \geqslant I$	$U' \geqslant U\frac{n'}{n}$

注　I、U、n、η 为被试电机铭牌值，加“′”的为陪试电机铭牌值。

3）短路法。对较高电压的电机进行换向检查及单个大功率电机没有条件用回馈法加负载时，可用短路法。

试验时，电枢回路应接有自动保护开关，以防止出现自励现象和过大的短路电流。电机的串励绕组应接成差复励；在无串励绕组时可按电机额定电流选择适当截面的电磁线，在主极上临时绕几匝串励线圈，其绕法如图 4.9-2 所示。为避免过电流，也可将供给被试电机励磁的励磁电源发电机接成差复励，励磁电源发电机的串励绕组的电流取自被试电机的电枢回路。

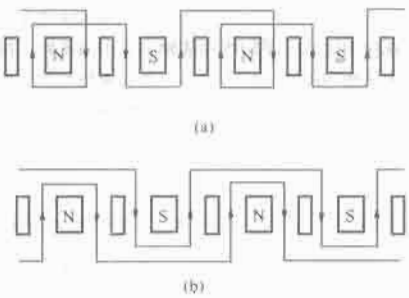


图 4.9-2　串励线圈绕法

（a）单根导线串励绕组绕法；（b）双路并联串励绕组绕法

1.2.7　换向检查、无火花换向区试验及换向调整

（1）换向检查

电机换向检查是指电机在接近正常工作温度，电刷位置维持不变时，检查电机在不同负载时电刷下火花的状况及其

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

对换向器表面的影响，其衡量的标准见表 4.9-4。

表 4.9-4 电刷下火花的状况及其对换向器表面的影响

火花等级	电刷下火花的程度	换向器及电刷的状态
1	无火花	换向器上没有黑痕，电刷上没有灼痕
$1\frac{1}{4}$	电刷边缘仅小部分有微弱的点状火花，或有非放电性的红色小火花	
$1\frac{1}{2}$	电刷边缘绝大部分或全部有轻微火花	换向器上有黑痕出现，但不发展，用汽油擦其表面即能除去，同时在电刷上有轻微灼痕
2	电刷边缘全部或大部分有较强烈的火花	换向器上有黑痕出现，用汽油不能擦除，同时电刷上有灼痕。如果短时出现这一级火花，换向器上不出现灼痕，电刷不被烧焦或损坏
3	电刷的整个边缘有强烈的火花，同时有大火花飞出	换向器上的黑痕相当严重，用汽油不能擦除，同时电刷上有灼痕。如果在这一火花等级下短时运行，则换向器上将出现灼痕，同时电刷将被烧焦或损坏

(2) 无火花换向区

无火花换向区是衡量直流电机换向能力强弱的标志。无火花换向区宽，表示电机换向能力强。无火花换向区测定方法如下：电机在一定负载下运行，对应于不同的负载电流，在换向极绕组内通入正或反向附加电流，逐渐增大此电流，直到电刷下出现火花为止。将电机保持无火花换向的最大正、反向附加电流值绘成曲线，即为无火花换向区域，见表 4.9-5。

为了在试验中便于调节和提高可靠性，附加外馈电源宜为他励，其试验线路图如图 4.9-3 所示。若被试电机的额定电压较高，应注意外馈电源有足够的对地绝缘强度，或将被试电机的换向绕组从电枢回路断开，另用一台功率较大的低压电源馈电。

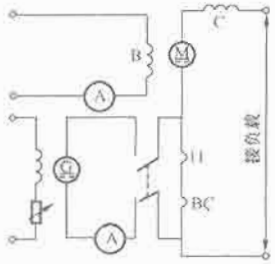


图 4.9-3 无火花换向区试验线路

无火花换向区域曲线形状的不同表示电机的换向性能不同，其定性分析见表 4.9-5。

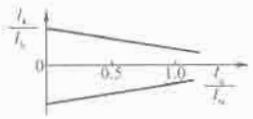
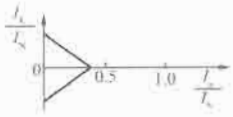
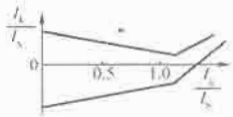
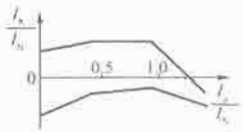
(3) 换向调整

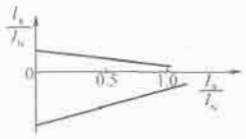
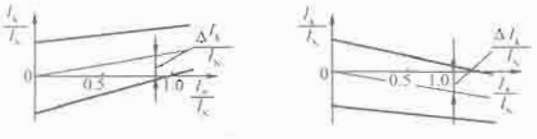
换向偏强或偏弱常通过调节换向极气隙来调整。调整后的气隙 δ'_k（mm）为

$$\delta'_k = \delta_k \frac{1}{1 \pm \frac{\Delta I}{I_N} \frac{\theta}{\theta - 1}} \tag{4.9-1}$$

式中，δ_k 为调整前的换向极气隙，mm；θ 为换向极与补偿绕组安匝之和与电枢安匝之比；ΔI 为无火花区中心线对应于额定电流 I_N 的附加电流值，A。

表 4.9-5 无火花换向区域曲线的分析

序号	1	2	3	4
曲线形状				
曲线形状分析	无火花换向区域的平均线和横轴重合，表示换向适当	换向区宽度过早封闭，应检查有无短路现象、接线有无错误、电刷有无跳动等。如果找不出问题，应检查设计	换向区宽度突然上翘，这多数发生在无补偿的电机中，当换向极极身饱和时，由于电抗电动势大于换向电动势，出现延迟换向，形成上翘特性	换向区平均线弯曲，对有补偿的电机，其弯曲程度可用来衡量补偿绕组的作用是否良好，补偿作用越好，则平均线越接近直线，对无补偿电机，此种弯曲程度，说明无补偿电机在不同负载下不可能具有同样可靠的换向

序号	5	6
曲线形状		
曲线形状分析	空载点正负外馈电流不对称，可能是电刷不在中性位置上	换向区平均线随负载增加而上翘或下垂，下垂说明换向偏强，上翘说明换向偏强，此时，一般应调整换向气隙

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

上式中“+”用于换向偏弱，“−”用于换向偏强。根据实践，若电动机的换向偏强，其换向极气隙实际调整量应比按式（4.9-1）计算值小些；对发电机来说，换向极气隙的实际调整量应比计算值大些。

对具有第二气隙的电机，上式中的 δ'_k 与 δ_k 分别为调整后和调整前的等效气隙。等效气隙可由第一气隙 δ_{k1} 和第二气隙 δ_{k2} 算得，其计算式为

$$\delta_k = \delta_{k1} + (0.8 \sim 2.0)\delta_{k2} \qquad (4.9\text{-}2)$$

当 δ'_k 值确定后，可根据不同情况确定第一气隙和第二气隙。对换向极较饱和的电机 δ_{k2} 常不小于 δ_{k2}；对主极极弧系数较大的电机，δ'_{k1} 常不大于 δ_{k1}。

1.2.8　其他试验项目

按 GB/T 1311《直流电机试验方法》进行。

2　安装

直流电机的安装工艺过程取决于电机的大小、质量和结构。大中型直流电机，特别是多电枢和多电机机组的安装工作比较复杂，安装的技术要求较高，其品质与电机运行的可靠性有直接联系。下面简单叙述大中型直流电机的安装要领。

2.1　安装前准备

设备到达安装工地后应立即开箱检查验收。暂时不安装的电机经验收后应保存在室温为 5～40℃、相对湿度小于 75%、无有害气体而且清洁的室内。保存期间应定期检查绕组、换向器、轴颈及其他主要零部件有无锈蚀、损坏等情况。

安装电机的基础在承受给定的静动载荷下，应不产生有害的下沉、变形或振动现象。因此，在安装前应对基础的品质和尺寸进行仔细检查，一般以被拖动设备的基础作为电机基础的基准，利用主纵轴线和主横轴线检查基础尺寸和底板上底脚螺孔的轴线，以便正确安装轴承座、定子和电机。

2.2　底板和轴承座安装

大中型直流电机的底板大多是整块的，也有由若干块组成的。底板安装时在其下面的各着力点垫以金属平垫块和成对的楔形垫块，用以调整底板的标高和水平度。垫块的数量、大小和分布应考虑垫块和二次灌浆承力面联合承受电机的静、动载荷以及基础螺栓固紧力的需要。底板标高偏差±0.5mm，水平偏差小于或等于 0.15mm/m，前后左右按基础主纵、主横轴线找正。底板水平调整和示意图如图 4.9-4 所示。在电机或机组总装配和最后调整后，进行浇固底板的工作，此前应仔细清除底板与混凝土接合部位的防锈漆和油污。

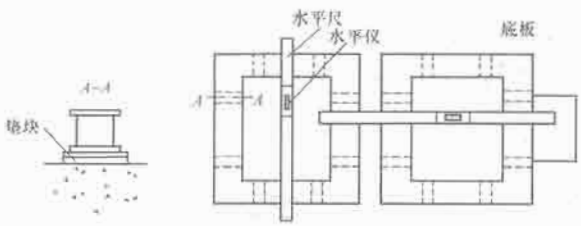


图 4.9-4　底板水平的调整

安装轴承座时必须保证电机的轴线与已装好的机组的主纵轴线在同一垂直面之内，且各轴承座的中心高一致，一般需经预装和最后调整两个过程。轴承座最后调整在调整轴中心线时进行。

安装轴承前应清洗并检查轴承座与轴瓦。各轴承座中心应在同一轴线上，用架线法检查和找正，左右允许偏差±0.10mm，轴向两侧中心距（l_1 与 l'_1、l_2 与 l'_2）允许偏差±0.5mm，如图 4.9-5 所示。绝缘轴承座的对地绝缘电阻在电机总装后，用 500V 兆欧表检查应不小于 1MΩ。

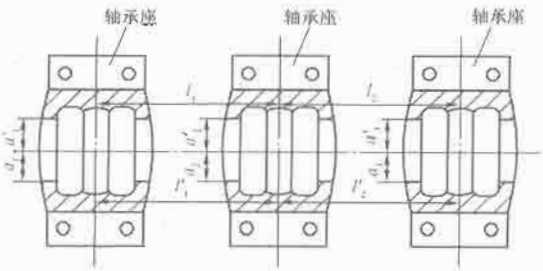


图 4.9-5　轴承座的定心

$l_1 = l'_1, l_2 = l'_2, a_1 = a'_1, a_2 = a'_2, a_3 = a'_3$

2.3　联轴器热套

联轴器有时采用热套工艺套装在轴上，联轴器加热的温度为 250～300℃。套装联轴器后，其端面与轴肩的配合端面应无间隙。

2.3.1　联轴器加热温度 t（℃）的估算

$$t = \frac{\delta + \Delta}{11D \times 10^{-6}} + t_0 \qquad (4.9\text{-}3)$$

式中，δ 为联轴器和轴的实测配合公盈，mm；Δ 为联轴器和轴套装时所需的最小间隙，mm，根据联轴器的直径和质量选取，一般为 0.2～0.4mm；t_0 为测量时的室温，℃；D 为联轴器内径，mm。

2.3.2　联轴器加热方法

联轴器可用油煮或感应加热等方法加热。大型联轴器一般使用感应加热法，绕在联轴器外表面的绝缘加热线圈中的电流 I 和匝数 N 可按下式计算

$$I = \frac{mt_1 cK}{UT} \times 10^3 \qquad (4.9\text{-}4)$$

$$N = \frac{UA\cos\alpha}{\rho I\, l} \qquad (4.9\text{-}5)$$

式中，m 为联轴器质量，kg；t_1 为联轴器加热温升，K，$t_1 = t - t_0$；c 为钢的比热容，$c = 0.5\text{kJ/(kg·K)}$；K 为热损失系数，一般 $K = 2 \sim 2.5$；U 为电源电压，V；T 为加热时间，h；A 为导线截面积，mm^2；l 为单匝长度，m；ρ 为电阻系数，$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$，铜线时 $\rho_{75} = 0.0217\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$；$\cos\alpha$ 为功率因数，通常取 0.5～0.7。

2.4　定子和电枢安装

定子和电枢进行安装前应先装好联轴器，然后根据定子和电枢的大小及结构情况决定安装工艺过程。整圆定子和大中型电机，一般先将电枢穿进定子，再把定子和电枢一起吊放在底板和轴承座上进行轴线调整。对于定子分半的大型电机，先将下半定子安装在底板上，再安装电枢，然后组装上半定子，分半定子吊装过程中，应将钢索系在合适位置并加以支撑，以防止变形，如图 4.9-6 所示。接着进行初步调整轴向窜动间隙、联轴器处两轴线的重合性及定子与电枢间的气隙。

轴向窜动间隙是指轴肩与轴瓦端面间的距离，应调整到传动端的两侧间隙 $a_1 = b_1$ 相等，非传动端的两侧间隙 $a_2 > b_2$（见图 4.9-7），同一端圆周各点间隙均匀，允许偏差不大

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

于平均间隙的10%。有止推轴承的电机，止推盘与推力瓦端间的间隙根据结构要求约为0.2～0.5mm。

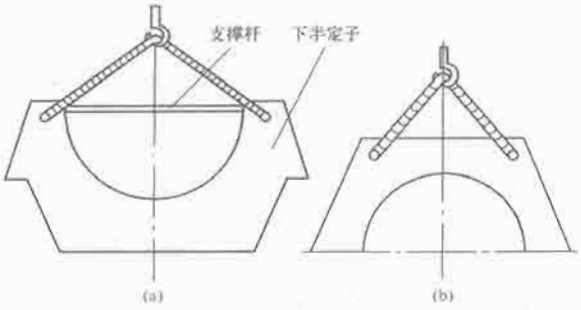


图4.9-6 分半定子的吊装
(a) 下半定子起吊；(b) 上半定子起吊

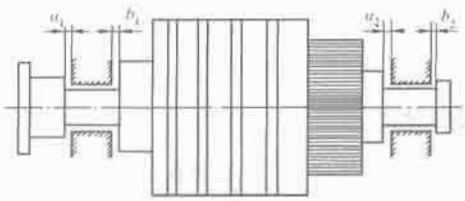


图4.9-7 电枢的轴向窜动间隙

用直尺和塞规测量相配两联轴器的径向间隙a和轴向间隙b，初步检查两轴线的重合性，如图4.9-8所示。若电枢位置正确，应无径向间隙，且沿圆周各轴向间隙相等。

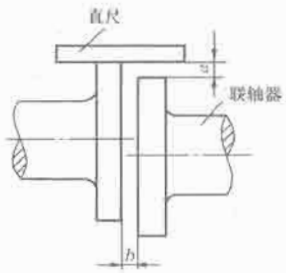


图4.9-8 两轴线的初步调整

调整各主、换向极与电枢间的气隙均匀，并符合设计要求。气隙小于3mm的，其最大、最小和平均气隙间的容差应不超过±10%；气隙大于或等于3mm的，应不超过±5%。同一轴线上前后端气隙之差不超过平均气隙的5%。各磁极间距离偏差不超过0.5～1mm。电枢铁心与定子磁极的轴向位置应对准。

2.5 机组轴线调整

机组轴线的调整是安装工作中的关键工序之一。机组各转轴的中心线应构成一条连续、光滑的挠度曲线，为此相互连接的两个联轴器的端面应保持平行并且同心，以保证相连两个联轴器的轴线重合，这种调整工作称为轴线定心。

当机组由两台机组成时，其中间联轴器两边轴颈应按水平要求安装，如图4.9-9(a)所示；当机组由三台电机组成时，其中间电机的轴应按水平要求安装，如图4.9-9(b)所示。整条轴线在机组两端轴颈处的扬度值（扬度值α为水平

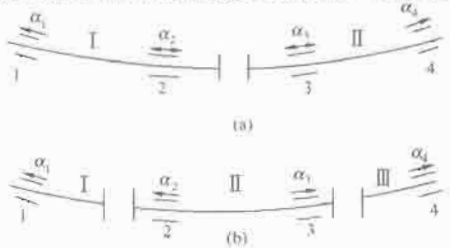


图4.9-9 机组的正确轴线
(a) 两电机机组；(b) 三电机的机组

仪的气泡向一个方向偏移时的读数），应尽可能相等而方向相反。

在特殊情况下，为考虑较合适的机组轴颈扬度值分配，往往将具有两轴承的电机轴颈或具有最重载荷的轴颈安装成水平。

2.5.1 轴线定心要点

一般用测量轴颈的水平度和联轴器的径向及轴向间隙方法进行机组轴线定心，即在联轴器外圆固定彼此相差180°位置的两对测量工具Ⅰ和Ⅱ，如图4.9-10所示。在两个电枢同时顺序回转0°、90°、180°、270°四个位置时，测量一组径向间隙和两组轴向间隙，如图4.9-11所示。

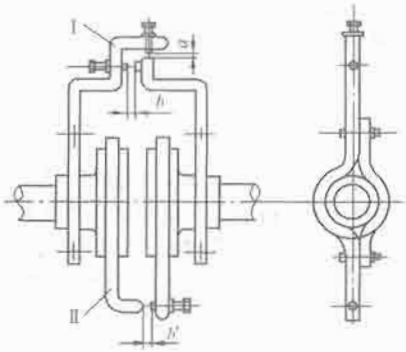


图4.9-10 两个联轴器间的间隙测量图

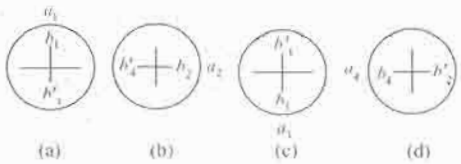


图4.9-11 在不同位置测得的两个联轴器的间隙
(a) 0°位置；(b) 90°位置；(c) 180°位置；(d) 270°位置

根据测量值按下列各式计算联轴器的径向和轴向偏差，即

$$a_y=\frac{a_1-a_3}{2} \tag{4.9-6}$$

$$a_x=\frac{a_2-a_4}{2} \tag{4.9-7}$$

$$b_y=\frac{b_1+b'_1}{4}-\frac{b_3+b'_3}{4} \tag{4.9-8}$$

$$b_x=\frac{b_2+b'_2}{4}-\frac{b_4+b'_4}{4} \tag{4.9-9}$$

式中，a_y为联轴器径向垂直偏差，mm；a_x为联轴器径向水平偏差，mm；b_y为联轴器轴向垂直偏差，mm；b_x为联轴器轴向水平偏差，mm；a_1、a_2、a_3、a_4为工具Ⅰ在0°、90°、180°、270°位置测得的联轴器径向间隙，mm；b_1、b_2、b_3、b_4为工具Ⅰ在0°、90°、180°、270°位置测得的联轴器轴向间隙，mm；b'_3、b'_4、b'_1、b'_2为工具Ⅱ在0°、90°、180°、270°位置测得的联轴器轴向间隙，mm。

2.5.2 轴线定心允许偏差和调整

机组轴线定心的允许偏差与联轴器的结构型式有关，允许偏差值见表4.9-6。

表4.9-6 机组轴线定心的允许偏差 单位：mm

联轴器型式	联轴器内孔直径ϕ	允许偏差	
		径向（a_x、a_y）	轴向（b_x、b_y）
刚性联轴器	≤400	0.03	0.02
	400～600	0.04	0.03
	>600～1000	0.05	0.04

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

联轴器型式	联轴器内孔直径 ϕ	允许偏差	
		径向（a_x、a_y）	轴向（b_x、b_y）
齿轮联轴器	<150	0.08	0.08
	≥150	$0.08+\frac{(\phi-150)}{100}\times0.01$	$0.08+\frac{(\phi-150)}{100}\times0.01$
弹性联轴器	<200	0.05	0.05
	≥200	$0.05+\frac{(\phi-200)}{100}\times0.01$	$0.05+\frac{(\phi-200)}{100}\times0.01$

一般通过调整靠近联轴器端的轴承高度和左右位置来消除轴线的径向偏心，通过调整离联轴器较远的轴承高度和左右位置来消除轴线的轴向偏斜。调整量为：

轴承1高度的增减值 ΔH_{y1}（mm）

$$\Delta H_{y1}=\frac{l_1 b_y}{R}+a_y$$

轴承1左右位移值 ΔH_{x1}（mm）

$$\Delta H_{x1}=\frac{l_1 b_x}{R}+a_x$$

轴承2高度的增减值 ΔH_{y2}（mm）

$$\Delta H_{y2}=\frac{l_2 b_y}{R}+a_y$$

轴承2左右位移值 ΔH_{x2}（mm）

$$\Delta H_{x2}=\frac{l_2 b_x}{R}+a_x$$

式中，l_1、l_2、R 为机组的有关尺寸，如图4.9-12所示。

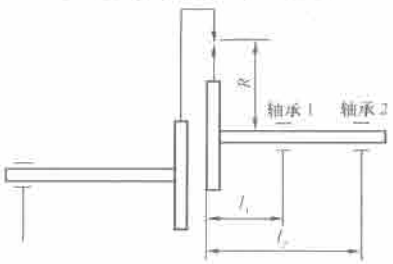


图4.9-12 机组轴线调整

2.6 轴承装配

滑动轴承装配包括测量和调整轴承各部分的间隙，检查和必要时研刮轴瓦的工作表面，接通润滑系统等工作。

轴颈与轴瓦的间隙是否适宜对轴承温度、电机振动有重要影响，其径向间隙一般见表4.9-7，侧向间隙约为径向间隙的一半。

表4.9-7 轴颈与轴瓦的径向间隙 单位：mm

轴颈直径	间隙	
	1000r/min及以下的电机	1000r/min以上的电机
80～120	0.08～0.16	0.12～0.21
>120～180	0.10～0.20	0.15～0.25
>180～250	0.12～0.22	0.18～0.30
>250～360	0.14～0.25	0.21～0.34
>360～500	0.16～0.30	0.24～0.45
>500～700	0.20～0.40	0.28～0.5

常用压铅丝法测量轴颈与轴瓦的径向间隙：把 $\phi1$～$\phi1.5$mm铅丝放置在轴瓦与轴颈的顶部之间，以及上下轴瓦接合面之间，上半轴瓦受一定压力后，测得铅丝变形后的厚度差 a_1-b_1（a_1为放置在轴颈顶部的铅丝变形后的厚度，b_1为上下半轴瓦左右两接合面间的铅丝变形后的平均厚度），即为径向间隙。

轴瓦与轴承上盖间的间隙：对圆柱形轴瓦为0.05～0.15mm，对球形轴瓦为±0.03mm。

轴瓦工作表面的接触角一般为60°～120°。重载和低速电机的轴承接触角较大，根据制造厂的规定，轴瓦可以不研刮。轴瓦必须研刮时，研刮过的下轴瓦工作表面上每平方厘米面积内与转轴轴颈的接触点数应不少于两点。

2.7 锥套直联式提升电机电枢安装

电机悬挂在提升机主轴的一端，结构示意图如图4.9-13所示。轴锥度为1∶30，紧量根据提升机力矩决定，一般为0.5～0.7mm。套轴的压力一般为60～65MPa。

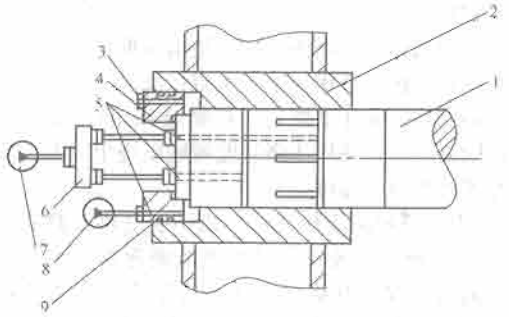


图4.9-13 结构示意图

1—轴；2—电枢；3—放气塞；4—液压盖；5—高压进油孔；6—分流器；7—超高压油泵；8—高压油泵；9—O形密封圈

先清理液压油盖及各配合零件表面，将O形密封圈嵌入油压盖密封槽内。用200×200框架水平尺校正轴的水平。

将电枢套入轴上，将液压盖固定于提升机轴端上，排气孔要位于上方，进油孔在下方。起动油泵8让油冲满电枢与液压盖腔体，气塞排气并有油喷出后拧紧放气塞。关闭油泵8。

起动油泵8再次向轴端腔体注入高压油，其压力表指针微动，电枢轻松地向轴大端移动，此时要在轴上标记好电枢位置，并按紧量计算出轴向位移尺寸且在轴上做好标记。在距标记10mm处再作一标记。

逐渐增加油泵8的油压到24MPa，同时起动油泵7向轴端面上两进油孔输油，逐渐增压至50MPa，这时电枢在轴向油压的推动下向主轴大端移动，逼近按紧量计算的标记。经过约30min后，若电枢仍未至紧量标记线时，再逐步增加油泵7的油压至60MPa，同时将油泵8的油压升至30MPa。当电枢移动至紧量标记线时，关闭油泵7停止供油，再关闭油泵8停止供油。油泵7的油压最大不要超过65MPa，油泵8的油压最大不要超过35MPa。

2.8 电机的干燥

电机在运输、贮存或停机过程中，绝缘易受潮而影响电气强度。在电机投运前，绝缘电阻如低于表4.9-8所列数值，应进行干燥处理。

表4.9-8 电机的绝缘电阻

电机电压（V）	电枢绕组		他（并）励绕组
	冷态绝缘电阻（MΩ）	绝缘吸收比 R_{60}/R_{15}①	冷态绝缘电阻（MΩ）
≤500	≥0.5	≥1.3	>1
>500	≥1.0	≥1.3	>1

① R_{60}和R_{15}分别为用兆欧表测电枢绕组对绝缘电阻历时15s和60s时所测得的绝缘电阻值。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

电机干燥通常用外部加热法、铁损耗干燥法或通电干燥法。当采用其中某一种方法不能获得必需的干燥温度或个别部分加热不均匀时，则可将其中某两种方法配合使用。

2.8.1 外部加热法

中小型电机或大型电机的局部可用不同热源通过对流或辐射进行干燥。干燥时要注意防止接近热源部位的局部过热。

2.8.2 铁损耗干燥法

使用电枢转轴为导体，由其两端通入低压工频交流电构成单匝励磁绕组，使电枢铁心内产生铁损耗而发热，以加热电枢铁心和绕组，进行电枢干燥。

2.8.3 通电干燥法

在绕组中通入一定电流，使用绕组铜损耗产生的热量进行干燥。这种方法不适用于绝缘电阻过低的电机。

1）励磁绕组通电干燥法。在励磁绕组中通入50%～80%额定励磁电流，并用压降法监视励磁绕组温度，使其不超过绝缘等级所容许温度的90%。

2）电枢绕组短路干燥法。电机作发电机短路运行，使电机产生50%额定电流，定时停机监测电枢绕组温度，调节短路电流大小以控制绕组温度不超过70℃。为防止电机自励，如电机有串励绕组，应事先断开，并将刷杆座顺电机旋转方向适当移位。

3）电枢静止通电干燥法。打开风机，电枢在静止状态下通入低压直流电进行干燥，此时，控制电枢温度在70℃左右，并按时盘动电枢，使各换向片、电枢线圈能轮流接入电路，以防止局部过热。

2.9 试车

试车的目的是综合检查电机安装品质，核实电机是否已具备正常运行条件。

试车前应检查电机内部接线、绝缘电阻、电刷位置、油路和通风系统以及线端与电源连接等是否符合规定的要求。

电机第一次起动应是空载起动，电机逐步升速到额定值，并空转1～2h，以检查电机有无振动、发热、漏油和异响等机械方面的安装问题。同时，在电机的额定电压下，观察电刷下的火花情况。停机后，全面检查定子、电枢机械部分有无缺陷和电枢绕组有无发热情况。

3 电机的维护

3.1 维护

直流电机在运行前后和运行过程中，应按运行规程的要求检查电机的静态和工作状况，对换向器、电刷装置、轴承、通风系统、绕组绝缘等部位重点加以维护。

1）电机应经常保持清洁，并防止油、水进入内部。在起动前应仔细清除在换向器、绕组、电刷装置、铁心、连接线等零部件表面上的灰尘、油污等。

2）换向器表面应保持光滑，并形成一层均匀的暗褐色光泽的换向器氧化膜。若换向器表面沾有炭粉、油污等杂物，应用干净、柔软的白布沾酒精擦除；如果换向器表面出现粗糙、不圆、烧伤等缺陷时，可用细砂布（切忌用金刚砂布）固定在木质支架上磨去缺陷。换向器外圆不允许有凹片、凸片。换向器外圆径向圆跳动量不应超过表4.9-9的值。换向器云母沟下刻深度和换向片边缘倒角见表4.9-10和图4.9-14。对片间电压较高的电机，为防止环火，换向片前端应倒角，如图4.9-15所示。

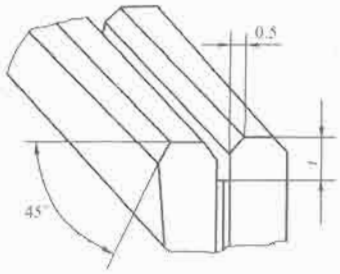


图4.9-14 换向器云母下刻和换向片倒角

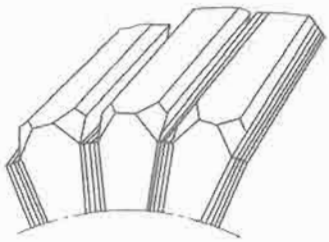


图4.9-15 换向片前端倒角

表4.9-9 换向器外圆容许径向圆跳动量

换向器线速度（m/s）	冷态跳动量（mm）	热态跳动量（mm）
≥40	0.03	0.05
15～40	0.04	0.06
<15	0.05	0.10

表4.9-10 换向器云母沟下刻深度 单位：mm

换向器直径	云母沟下刻深度
<50	0.5
50～150	0.8
>150～300	1.2
>300	1.5

3）电刷应保持在中性位置，轴向和周向位移正确。其工作表面应光滑、无雾状、麻点、电蚀、沟纹和灼伤等缺陷。刷盒底部离换向器表面距离一般应调整到(2.5±0.5)mm。圆周方向刷距偏差不超过1mm，电刷压力应均匀适宜，相差在10%以内。电刷在刷盒中应能灵活上下滑动，但不晃动。

4）进入电机内部的冷却空气应清洁干燥，不含腐蚀性有害气体。进风温度以不超过40℃、不低于5℃为宜，湿度不超过85%，绝对湿度最好在5～12g/m³范围内，含尘量不超过0.1mg/m³。定期检查出风温度及绕组、铁心、换向器部分的温升是否在容许范围内。

带有水冷冷却器时，应经常检查进水温度（不高于33℃），有无漏水或堵塞等现象。对过滤器要定期清洗，对风道漏风点要及时处理。

5）滚动和滑动轴承的维护见表4.9-12。

6）配备在线检测装置的电机在运行中除监视换向状态外，还应认真监视和记录电机的电压、电流、温升、绝缘电阻和润滑等数据。定期检查电机的过载、过速、过热等各种保护装置。

3.2 常见故障

由于制造、安装、使用与维护等原因，电机在运行中可能出现机械或电气方面的故障。直流电机常见的换向故障及其排除法见表4.9-11。一般故障及其排除方法见表4.9-12。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 4.9-11 直流电机常见换向故障和排除方法

序号	故障原因	故障症状																				排除故障方法
		电刷滞出边火花	电刷滞入边火花	刷杆火花不均布	空载火花	环火	按电枢槽距烧伤换向片	按极对距烧伤换向片	按重路数片距烧伤换向片	换向器表面烧黑	换向器氧化膜形成不良	换向片拖出铜毛刺	换向器表面出现条纹	换向器过热	换向器磨损过快	电刷碎裂、掉边缺角	电刷振动、噪声过大	电刷磨损过快	电刷刷体、刷辫红热	电刷接触表面拾铜	电刷接触表面烧痕	
1	换向极磁场偏强		·				·			·	·											加大气隙或换向极绕组分流
2	换向极磁场偏弱	·					·			·	·										·	减小气隙或增大刷宽
3	换向区（电刷）太宽		·				·			·	·											减小刷宽
4	换向区（电刷）太窄	·					·			·	·										·	增加刷宽，切向位移电刷
5	电机过载、频繁正反转	·				·	·			·	·	·		·	·			·	·		·	限制过载
6	机械振动	·	·		·											·	·					消除振源
7	片间电压过高	·	·		·	·															·	限制电压，加隔弧板
8	电刷不在中性位置上	·	·		·		·															调整电刷位置
9	电枢绕组焊接不良、开焊	·						·		·											·	补焊
10	换向器升高片断裂	·						·		·											·	修理好
11	换向片或电枢绕组匝间短路	·						·		·											·	消除短路
12	换向极磁路饱和	·				·																限制负载
13	不对称多重路绕组片间电压脉动				·				·													采取调节电刷切向位移量及改善滑动接触品质等措施
14	多重路绕组支路电流分布不均				·				·													
15	换向器偏心	·					·	·														车换向器外圆
16	换向极、补偿绕组接反或短路	·			·																	改接或消除短路
17	换向片或云母片凸出	·					·									·	·					车换向器，下刻片间云母，紧换向器
18	换向片倒角不良，沟内有炭粉	·	·									·					·			·		重新倒角，清除炭粉
19	换向器表面油污										·		·						·	·		清除油污
20	气隙不均	·	·	·	·																	调整气隙
21	定子极距不均	·	·	·	·																	调整极距
22	电刷刷距不均	·	·	·	·		·												·			调整刷距
23	电刷晃动或随动性差	·	·	·																		调整电刷与刷盒间隙
24	电刷压力不正确或不均匀	·		·			·							·	·	·	·	·	·			调整电刷压力
25	刷盒离换向器太高	·														·	·					调整刷盒位置
26	电刷接触面小	·	·	·																		研磨电刷
27	电刷抑制火花能力差	·					·		·	·	·											更换电刷牌号
28	电刷形成氧化膜能力差	·					·		·	·	·					·	·	·				更换电刷牌号
29	电刷摩擦系数大													·	·	·	·	·				更换电刷牌号
30	电刷磨损率大	·				·							·					·				更换电刷牌号

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

序号	故障原因	故障症状																			排除故障方法	
		电刷滑出边火花	电刷滑入边火花	刷杆火花不均布	空载火花	环火	按电枢槽距烧伤换向片	按极对距烧伤换向片	按重路数片距烧伤换向片	换向器表面烧黑	换向器氧化膜形成不良	换向片拖出铜毛刺	换向器表面出现条纹	换向器过热	换向器磨损过快	电刷碎裂、掉边缺角	电刷振动、噪声过大	电刷磨损过快	电刷刷体、刷辫红热	电刷接触表面拾铜	电刷接触表面烧痕	
31	电刷有金刚砂或碳化硅										·	·	·		·							更换电刷牌号
32	电刷牌号混用	·	·	·			·			·						·	·		·	·		统一电刷牌号
33	电刷电流密度过低										·		·			·	·	·		·		减少电刷或提高负载
34	空气湿度低										·		·			·				·		调节湿度
35	空气含尘量大										·		·		·			·				检查、清理空气过滤器
36	进风温度过高													·								降低进风温度

表 4.9-12 直流电机一般故障与排除故障的措施

故障		原因	排除措施
绝缘电阻低		1. 电机绕组和导电部分有灰尘、金属屑、油污物 2. 绝缘受潮 3. 绝缘老化	1. ①用压缩空气吹净；②用上述方法无效时，用弱碱性洗涤剂水溶液进行清洗，或用专用清洗液清洗，然后干燥处理 2. 烘干处理 3. 浸漆处理或更换绝缘
电枢接地		1. 金属异物使线圈与地接通 2. 电枢绕组槽部或端部绝缘损坏	4. 用 220V 小容量试灯查出接地点，排除异物 5. 用低压直流电源测片间压降或片与轴间压降，找出故障，更换故障线圈
电枢绕组	短路	1. 电枢线圈接线错误 2. 换向片间或升高片间有焊渣等短接 3. 匝间绝缘损坏	6. 按正确接线纠正线圈与升高片的连接 7. 测量片间压降，查出并清除故障点 8. 更换绝缘
	断路	1. 接线错误 2. 线圈和升高片、并头套开焊	9. 同措施 6 10. 补焊
	接触电阻大	1. 线圈和升高片、并头套焊接不良 2. 升高片和换向片焊接不良	11. 同措施 10 12. 补焊和加固其连接
换向器	片间短路	1. 片间云母损坏 2. 片间有碳粉或铜屑短接 3. 换向器 3°面涂封不好，进入异物	13. 拆开换向器更换片间云母后重新组装 14. 吹净、换向片倒角 15. 清除金属异物，做涂封处理
	接地	1. V 形绝缘环 30°锥面损坏 2. 换向器内部进入金属异物 3. V 形绝缘环 3°锥面有灰尘引起爬电	16. 拆开换向器，更换 V 形绝缘环 17. 拆开换向器，清除异物 18. 清除灰尘，加强绝缘涂封
	外圆变形	1. 片间云母，V 形绝缘环产生热收缩 2. 压圈、螺母等紧固件运行后松动	19. 在换向器热态下，对称均匀地紧螺母 20. 同措施 19，圆跳动超过表 4.9-9 规定时，车换向器外圆
	升高片断裂	1. 扭振或机械冲击使升高片疲劳破坏 2. 升高片材质硬脆 3. 升高片有机械损伤	21. 改进升高片固定结构，防止运行时谐振 22. 局部更换升高片 23. 同措施 21
电机过热		1. 负载过大 2. 电枢线圈短路 3. 主极线圈短路 4. 电枢铁心绝缘损坏 5. 冷却风量不足，环境温度高，内部不洁	24. 减小和限制负载 25. 同措施 6、7、8 26. 查出短路点，补强绝缘 27. 局部或全部进行绝缘处理 28. 清理电机内部，增大风量，改善冷却条件

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

故障		原因	排除措施
发电机不发电，电压低，不稳定		1. 电枢线圈匝间短路 2. 励磁绕组断路、接错线 3. 电刷不在中性位置 4. 转速不够	29. 同措施6、7、8 30. 查出原因，纠正接线 31. 调整电刷到中性位置 32. 提高转速
电动机转速不正常		1. 励磁线圈断路、短路，接线错误 2. 电刷不在中性位置 3. 起动器接触不良，电阻不适当 4. 负载力矩过大	33. 纠正接线错误，消除短路 34. 同措施31 35. 更换合适的起动器 36. 减少负载阻力矩
机械振动		1. 基础不坚固或电机固定不牢固 2. 机组、电机轴线定心不正确 3. 电枢不平衡 4. 轴颈与轴瓦间隙太大或太小	37. 增加基础的坚实性，加强电机的固定 38. 重新正确调整好机组轴线定心 39. 重校电枢平衡 40. 调整其间隙
滚动轴承发热、噪声大		1. 轴承内润滑脂过多或过少 2. 滚珠（滚柱）磨损 3. 轴承（内圈）与轴配合过松或过紧，轴承（外圈）与端盖过松或过紧	41. 维持适量的润滑脂，一般占轴承室容积的2/3～3/4 42. 更换轴承 43. 过松时，可用金属喷镀或镶套筒；过紧时，需重新加工使其达到要求的配合精度
滑动轴承发热、漏油		1. 轴颈与轴瓦间隙太小，轴瓦研刮不好 2. 油环运转不灵活，油路不畅或油泵有故障 3. 润滑油牌号不适合，油内含杂质和脏物 4. 油箱内油位过高 5. 轴承密封不好，轴承座接合面间隙过大	44. 研刮轴瓦，使轴颈与轴瓦间隙合适 45. 更换油环，排除油路系统故障，保证润滑油量充足 46. 更换合适的润滑油，清除杂质 47. 减少油量 48. 改进密封结构，研刮轴承座上下接合面使之密合
通风冷却系统	冷却器漏水	冷却器管与承管板铆接不良	49. 补焊止漏
	冷却器堵塞	冷却水管内部积聚杂质	50. 冲洗水管，必要时加水过滤器
	冷却器温度高	1. 冷却器容量小 2. 进水温度高	51. 加大冷却器容量 52. 降低冷却器进水温度
	冷却空气含尘量大	1. 过滤器效能差 2. 电机密封不严	53. 清洗过滤器，改进结构，更换过滤器内介质 54. 防止电机漏风
	风道潮湿油腻	1. 冷却器漏水，轴承漏油 2. 进风湿度高	55. 消除漏水、消除漏油 56. 降低进风湿度

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第10章 主要产品

我国现有直流电动机产品有基本系列和专用系列两大类。

基本系列直流电动机，按尺寸大小分为小型、中型和大型三个系列。在此基础上，可派生出直流发电机及其他规格及用途的直流电动机。

专用系列产品主要有起重、冶金用直流电动机，矿山车辆用牵引电机，直（脉）流牵引电动机等。

1 基本系列

1.1 Z4系列中小型直流电动机

Z4系列是继Z2、Z3系列发展起来的新系列，已成为我国直流电动机的主导系列之一。系列的转矩范围大致为15～12200N·m，包括中心高（mm）为100，112，132，160，180，200，225，280，315，355，400和450共13个机座号。

1.1.1 用途

本系列可用三相桥式整流电源、不外接平波电抗器而长期工作。具有体积小、性能好、重量轻、输出功率大、效率及可靠性高的特点。被广泛地用作各类机械设备的传动源，如金属切削机床、冶金工业轧机传动、造纸、印刷、水泥、橡塑机械等。

1.1.2 功率、电压和转速

本系列电动机功率范围为1.5～800kW。

电动机额定电压为160V和440V，也可根据具体情况派生出其他电压。标准励磁电压为180V，也可选用其他电压。

电动机额定转速（r/min）有3000，1500，1000，750，600，500，400，300和200共九级。

电动机功率与转速的关系参见本章3.1节。

1.1.3 调速范围及过载能力

本系列电动机恒功率弱磁调速最高转速可达2～4倍额定转速。恒转矩降压调速最低转速可至20r/min。

电动机在额定转速及以下时的过载能力为1.6倍额定电流左右，弱磁调速时的过载能力按转速比例逐渐下降到1.0倍额定电流。

1.1.4 供电电源及绝缘等级

本系列电动机中，额定电压440V的电机采用三相全控桥式晶闸管整流电源供电，可不外接平波电抗器长期工作。额定电压为160V、由单相桥式晶闸管整流电源供电的电动机，其电枢回路需接入5～20mH的平波电抗器以抑制电流脉动。

电动机的绝缘等级为F级，采用可靠的绝缘结构及浸渍工艺。

1.1.5 防护等级、安装型式和冷却方法

本系列电动机的防护等级均为IP21S，也可做成IP44。

电动机的安装型式有IM B3、IM B35、IM V1和IM V15等。

电动机的标准冷却方法为他冷（IC06）强迫通风，在径向配有骑式鼓风机，独立供电并附空气过滤器；也可制成IC17、IC37或ICW86。

1.1.6 结构特点

本系列电动机的基本结构是八角形机座，全叠片定子磁轭，垂直防滴，安装底脚在前、后端盖上，出线盒位于机座侧面。315机座号及以上电机配有补偿绕组，250及280机座号电机必要时也可配备补偿绕组，其他机座号电机均无补偿绕组。

1.2 Z系列中型直流电动机

Z系列中型直流电动机系列的转矩范围大致为2～50kN·m，有355mm，400mm，450mm，500mm，560mm，630mm和710mm共7个机座号。

1.2.1 功率、电压和转速

中型直流电动机的功率、电压和转速等级采用软性等级，即在按一定规律进行系列设计的基础上，电动机的功率、电压和转速按用户的需要和系列设计中的优化组合确定。这样，可最大限度地发挥电动机的额定容量和性能。

本系列电动机的标准额定电压（V）有220，440，550，660，750，800，1000等12种。当采用晶闸管整流电源供电时，整流脉波数应不小于6，在额定基速、额定电枢电压和额定负载下的相控因数不应低于85%。

电动机的基本励磁方式为他励。励磁绕组分为两组，两组串联时励磁电压为220V；两组并联时为110V。也可以根据具体情况派生出360V以下的其他电压。电动机能够承受500V的强励电压。

电动机功率与转速的关系参见本章3.2节。

1.2.2 分类及主要技术性能

中型直流电动机按其基本用途分三类：

1）A类。普通工业用直流电动机。

2）B类。金属轧机用直流电动机。与A类电动机相比，有较强的机械结构。基本转速时，还有在115%额定负载下连续运行和125%额定负载下运行2h的长时过载能力，但此时电动机温升和其他特性另有规定。

3）C类。可逆轧机用直流电动机，用来传动可逆热轧机及其辅助机械，其特点为：①有适合传动快速逆转和突然施加重负载的机械结构。②有高的短时过载能力。

三类电动机在过载能力方面有差别，它们的1min短时过载能力见表4.10-1～表4.10-3。短时过载之后，必须轻载运行，使电动机整个负载周期的负载均方根值不超过其连续定额值。

表4.10-1 A类电动机的短时过载能力 单位：%

基本转速的百分数	额定电流的百分数	
	偶尔使用①	经常使用②
100	150	140
200	150	130
300及以上	140	125

① 偶尔使用的短时过载能力是指很少发生或在紧急情况下，电动机在1min时间内能承受的过载能力，建议将断路器的瞬间开断装置按此过载能力整定。

② 经常使用的短时过载能力是指作为正常工作周期的一部分，电动机反复承受超过额定负载的能力。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 4.10-2 B类电动机的短时过载能力 单位：%

基本转速的百分数	额定电流的百分数	
	偶尔使用①	经常使用②
100	200（180）	175（160）
200	200（180）	160
300及以上	175（160）	140

注 当电动机的基速等于或大于表4.10-4中的数值，用括号内的数值。

① 偶尔使用的短时过载能力是指很少发生或在紧急情况下，电动机在1min时间内能承受的过载能力，建议将断路器的瞬间开断装置按此过载能力整定。

② 经常使用的短时过载能力是指作为正常工作周期的一部分，电动机反复承受超过额定负载的能力。

表 4.10-3 C类电动机的短时过载能力 单位：%

基本转速的百分数	偶尔使用的负载		经常使用的负载	
	基速额定转矩的百分数	基速额定电流的百分数	基速额定转矩的百分数	基速额定电流的百分数
93	275	256	—	—
95	—	—	225	214
125	190	248.5	166	207.5
150	162	242.5	135	202
175	135	236.5	112	196.5
200	115	230	95.5	191
225	99.5	224	82.5	185.5
250	87.5	216	72	180
275	77	212	63.5	174.5
300	68.5	206	56.3	169

表 4.10-4 机座中心高与转速

中心高（mm）	355	400	450	500	560	630	710
基速（r/min）	1000	900	800	710	630	560	560

1.2.3 供电电源及绝缘等级

本系列电动机采用三相全控桥式晶闸管整流电源供电，在额定电压、额定基本转速和额定负载电流下，相控总量不小于85%、电流脉动率不超过10%时，可不外接平波电抗器。

本系列电动机的绝缘等级为F级，采用可靠的绝缘结构及浸渍工艺。

1.2.4 冷却方式、防护等级和安装型式

当电机的冷却方式为IC06和IC17时，对应的防护等级是IP23；当电机的冷却方式为IC37和ICW86时，电机的防护等级是IP44。

标准型电动机的安装型式为IM B3。

1.2.5 设计及结构特点

本系列电动机采用多角形结构，以提高定子内部的空间利用率；定子磁轭与换向极采用叠片结构，以减少电机负载突变时在换向极磁路中产生的有害的涡流阻尼作用，使电动机能够承受每秒200倍额定电流的电流变化率；采用F级绝缘结构和无溶剂真空压力浸漆，使绕组具有良好的抗潮能力和机械强度；电机的安装底脚在前、后端盖上；出线盒在机座的侧面；全系列电动机都带有补偿绕组；全系列电机均采用滚动轴承。

1.3 大型直流电动机

大型直流电动机通常指电枢直径超过1m的电动机，主要用于驱动轧机和矿井提升机械。由于大型直流电动机的规格和技术性能要求随着主机的变化而各不相同，所以只能形成有一定标准化、通用化程度的系列框架，很难形成中小型电动机那样的系列。

1.3.1 分类

根据使用特性的不同，大型直流电动机一般分为轧机电动机和矿井提升电动机两大类。

（1）轧机电动机

大型轧机电动机按负载性质和运行方式分为以下三类：

第一类：按需要设计成单向或双向运转，特点是有较强的机械结构和较高的短时过载能力、缓慢升降速、不要求低转动惯量。主要用于没有连续过载要求的普通金属轧机主传动及其辅传动机械，如非可逆运转的型材、管材轧机、轮毂轧机等。其型谱见本章3.3节表4.10-7。

第二类：除第一类电动机的特点以外，还具有连续过载能力、较小的转动惯量、较大的弱磁调速比。主要用于传动除普通金属轧机和可逆热轧机以外的、有连续过载要求的金属轧机主传动及其辅传动机械，如热连轧轧机、冷连轧轧机等。其型谱见本章3.3节表4.10-7。

第三类：有很强的机械结构和高短时过载能力、较小的转动惯量，适合于快速逆转和承受突加重负载、频繁间断的冲击负载，如初轧机、大型管材型材轧机的可逆机架。其型谱见本章3.3节表4.10-8。

为了满足轧机快速性的要求，大型直流电动机除单电枢外，有时还可制成双电枢乃至三电枢电动机。

（2）矿井提升直流电动机

这类电动机的特点是转速低、功率大、可正反转运行、负载相对平稳。国产大型矿井提升直流电动机的最低转速和最大功率约为20r/min和3000kW。通常，电动机以降压恒转矩的调速方式运行，在整个转速范围内，特别是低速时电动机应运行稳定。

1.3.2 供电电源、绝缘等级和过载能力

供电电源和绝缘等级基本上与中型直流电动机系列相同，电动机的基本励磁方式为他励。轧机电动机能够承受5倍额定励磁电压的强励励磁。

第一类、第二类轧机电动机的短时（60s）过载能力见表4.10-5。

第三类轧机电动机的短时（60s）过载能力见表4.10-6。

表 4.10-5 第一、二类电动机的短时过载能力 单位：%

基速的百分数	额定电流的百分数	
	偶尔使用	经常使用
100	200	175
200	200	160
300及以上	175	140

表 4.10-6 第三类电动机的短时过载能力 单位：%

基速的百分数	偶尔使用的负载		经常使用的负载	
	基速额定转矩的百分数	额定电流的百分数	基速额定转矩的百分数	额定电流的百分数
93	275	256	—	—
95	—	—	225	214
125	199	248.5	166	207.5

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

基速的百分数	偶尔使用的负载		经常使用的负载	
	基速额定转矩的百分数	额定电流的百分数	基速额定转矩的百分数	额定电流的百分数
150	162	242.5	135	202
175	135	236.5	112	196.5
200	115	230	95.5	191
225	99.5	224	82.5	185.5
250	87.5	218	72	180
275	77	212	63.5	174.5
300	68.5	206	56.3	169

注 在100%负载下把电动机磁场调节到100%基速时，施以表列负载而出现的近似转速。

第二类轧机电动机的长时间过载能力为：

在额定电枢电压和额定转速范围内以115%额定负载连续运行；在额定负载连续运行之后，紧接着以125%额定功率负载运行2h。

矿井提升直流电动机的短时过载能力参照第一类轧机电动机。

1.3.3 冷却方式和防护等级

大型直流电机一般均采用强迫通风，即IC17、IC37。进出风位置一般在电机下部，从传动端进风，换向器端出风。也可以制成电机本体和换向器分两路单独通风。

电机的防护等级有IP01、IP23、IP44等多种。

1.3.4 结构特点

大型直流电动机一般采用卧式、圆柱形轴伸。轴承大多采用座式滑动轴承，自带油环外加强迫循环油复合润滑方式。轴承座上可安装测温装置。

电枢铁心叠压成斜槽，使电动机在整个运行转速范围内运行平稳，并有效防止电磁噪声。

矿井提升用直流电动机还有无轴、无轴承结构，电枢直接悬挂在提升机主轴上。它与提升机主轴的连接方式有三种：①锥套过盈连接，液压装卸。②夹板式配合螺栓连接。③夹板式高强度螺栓摩擦连接。

2 专用系列

2.1 起重、冶金用直流电动机

起重、冶金用直流电动机结构坚固，过载能力大，调速范围宽，能承受振动、冲击、频繁起动和制动，快速正反转的工况。广泛应用于起重运输设备、轧机辅传动、挖掘和港口机械中。

国内起重、冶金用直流电动机的主导产品是ZZJ-800系列轧机辅传动直流电动机。在此基础上，派生出低惯量轧机辅传动直流电动机。

2.1.1 ZZJ-800系列轧机辅传动直流电动机

本系列电动机符合国际电工委员会标准IEC34-13《起重、冶金辅机用电动机技术规范》，可与国外的800系列电动机互换。

(1) 性能

本系列电动机的转矩范围约为35～4100N·m（正在扩展到14000 N·m）。电动机用三相全控桥式晶闸管整流电源供电时，可不外接平波电抗器。

电动机的定额有S1连续工作制的连续定额、30min或60min的S2短时工作制定额和S3-30%的断续周期工作制定额。

电动机的额定电压为220V或440V，允许提高电压到500V恒转矩运行。

电动机的励磁方式有他励、串励和复励。复励时，串励和他励的励磁安匝比约为1∶1。

电动机的绝缘等级为F级。

电动机的电动机功率、电压和转速见本章3.4节。

(2) 结构特点

1) 采用结构刚性好的机座和端盖。

2) 转轴材料采用合金钢，在强度设计中留有相当的裕量，能承受频繁的冲击性过载。

3) 电枢铁心与转轴之间采用热套过盈配合，以适应频繁起动、制动、快速正反转的运行工况。

4) 换向片与升高片为整体结构，与电枢线圈之间的连接采用钨极惰性气体保护焊（TIG），因而具有良好的电气性能和机械强度。

5) 定子磁极和电枢采用无溶剂真空压力浸漆处理，具有良好的绝缘性能和整体性。

6) 滚动轴承备有不停车加油结构，便于清理和维护。

7) 电动机两个轴伸的尺寸和承载能力相同，两端的安装尺寸对称，可以根据出线方向需要使用任一轴伸。

8) 卸去或装上机座上的窗盖，即可根据需要在封闭自冷和强迫通风之间变换冷却方式。

2.1.2 低惯量轧机辅传动直流电动机

ZZJ-800系列电动机的总体方案设计是，同一台电机通过适当的调换来满足不同防护等级、工作制的要求。受到散热条件的限制，电动机的转动惯量和体积相对较大，显然不合适对电动机快速动态性能有更高要求的电力拖动系统。

为此，在ZZJ-800系列电动机的基础上，派生出两个低惯量轧机辅传动直流电动机系列：

ZZJ-900系列低惯量轧机辅传动直流电动机和ZFQZ型频繁起制动直流电动机。

ZZJ-900系列电机的安装尺寸、功率等级与ZZJ-800系列电机相一致，可以相互替换。ZFQZ型电机的安装尺寸和功率等级未受此限制，目前该系列电动机的最大额定功率为800kW，额定电压有440V、550V、660V、750V等。

针对提高电动机单位转动惯量的输出转矩的要求，采取了相应的技术对策和措施：

1) 减小电枢铁心直径，增加电枢的铁心长度，以获得尽可能小的转动惯量。ZZJ-900系列电机的转动惯量仅为ZZJ-800系列电机的65%左右，而ZFQZ系列电机仅为ZZJ-800系列电机的45%左右。

2) 电动机的总体方案按照外通风的形式来设计，不考虑全封闭自冷的方式。这样可以从提高初级冷却介质的风量和风压，减少电动机内部的风阻着手，尽可能地增加冷却效果，以提高电机单位体积的输出转矩。

3) 采用叠片式定子磁轭，使电动机能够承受每秒200倍额定电流的电流变化率，以适应电流急剧变化之工况。

4) 这两个系列电动机均带补偿绕组，电机具有优良的换向性能和过载能力。其中ZFQZ型电动机在满励磁状态下的过载转矩为额定转矩的3倍，其起动转矩为额定转矩的3.5倍。

2.2 矿山车辆用牵引电机

矿山车辆用牵引电机简称牵引电机，牵引电机是指装在

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

各种矿山车辆上，执行不同功能的电机。

用于驱动车辆的电机称为主牵引电动机，起各种辅助功能的电机称为辅助牵引电机。

该类牵引电机符合国际电工委员会标准 IEC 60349(1991)《铁路和道路车辆用旋转电机规则》和 IEC 60349-2《铁路机车车辆和公路车辆用旋转电机 第2部分：电子变流器供电的交流电动机》。

(1) 特点

1) 牵引电机装在各种车辆上，并借助各种传动装置驱动车辆。其结构紧凑，具有较高的技术参数，采用高等级、高性能的绝缘材料和导磁材料、复杂而先进的制造工艺，因而价格比普通电机的高。

2) 由于牵引电机的供电方式、安装型式、技术规格均随车辆而定，因此牵引电机很难形成系列，只能在一定范围内形成有一定标准化、通用化程度的系列框架。

3) 牵引电机需要经常起动、过载、制动以及在磁场削弱条件下运行，换向比普通直流电机困难得多。

4) 牵引电机有个别传动和组合传动两种传动方式，传动装置比较复杂。个别传动分抱轴式悬挂和架承式悬挂。组合传动为一台牵引电动机通过齿轮变速装置拖动一个转向架的轮对，一台电机完全固定在一个转向架上。

5) 牵引电机的起动有降低端电压、串接电阻、斩波调阻、斩波调压等多种方式。

6) 牵引电机通常采用机械制动、电阻制动和再生制动。再生制动仅适用于由接触网供电的牵引电机。

(2) 产品设计及结构特点

牵引电机的功率范围从1～650kW，转速由车辆速度决定，最高可达3000r/min，工作制有S1连续、S2短时(10min、30min、60min、90min四种)和S3断续周期等工作制(电机的工作制与其对应的冷却方式没有关联)。

牵引电机的励磁方式大多采用串励，也可根据牵引控制的需要采用他励。并励和复励只在辅助牵引电机中采用。

牵引电动机的供电方式有接触网供电、蓄电池供电、安装在机车或车辆上的电源供电三种。后两种供电方式电压值无明确规定，由车辆或系统设计的合理性来决定。接触网供电的额定电压有250V、500V、600V、750V、1500V和3000V。

牵引电动机采用F、H和200级绝缘，无溶剂真空压力浸漆、旋转烘焙工艺，使电机具有良好的绝缘性能、散热能力和整体性以承受高热负荷、提高电机单位体积的输出转矩。

牵引电动机的结构特点有：

1) 除普通电机的安装方式外，还有电动轮安装、抱轴式悬挂和架承式悬挂方式。

2) 防护形式有开启式和封闭式两种，冷却方式有自冷式和强迫通风等方式，根据车辆的性质不同而各不相同。

3) 大功率直流牵引电机机座采用多边形(一般为八角形)结构，与圆形机座相比，提高了定子内部的空间利用率。

4) 主极、换向极采用一体化结构，不仅改善定子绕组的散热条件，还增加电气绝缘强度，提高运行可靠性。

5) 换向器与电枢导线的连接采用氩弧焊(TIG)，消除锡焊焊接不良、脱焊的可能。

6) 换向片采用银铜梯排，以提高换向器的强度，增加换向片的耐磨性。

7) 电刷采用双分瓣、高电阻电刷，以改善换向性能。

8) 定子磁轭和换向极采用叠片结构，换向极螺栓采用非磁性材料，有效地减少了电机车剧烈的过渡过程中换向回路中涡流的阻尼作用，实现可靠换向。

9) 在功率大难度高的电机中，电枢绕组导体在槽内的放置放弃了传动的立放方式，改为交叉立放、平放或平放加交叉放置的方式来提高槽满率，改善电枢绕组散热，增加电机的输出功率。

2.3 直流牵引电动机

见第14卷第2篇第3章“牵引装置”。

3 直流电动机功率—转速图与型谱

3.1 Z4系列直流电动机功率—转速图

Z4系列直流电动机功率与转速的关系如图4.10-1～图4.10-3所示。

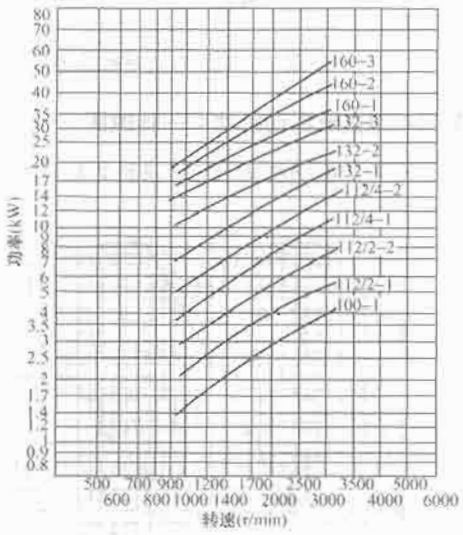


图4.10-1 Z4-100～Z4-160直流电动机功率—转速图

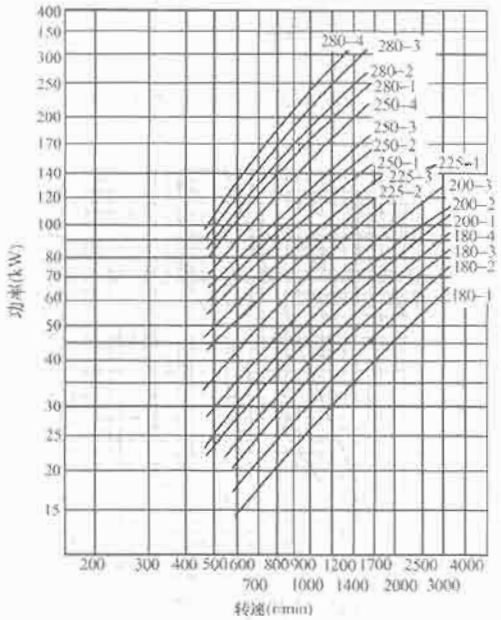


图4.10-2 Z4-180～Z4-280直流电动机功率—转速图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

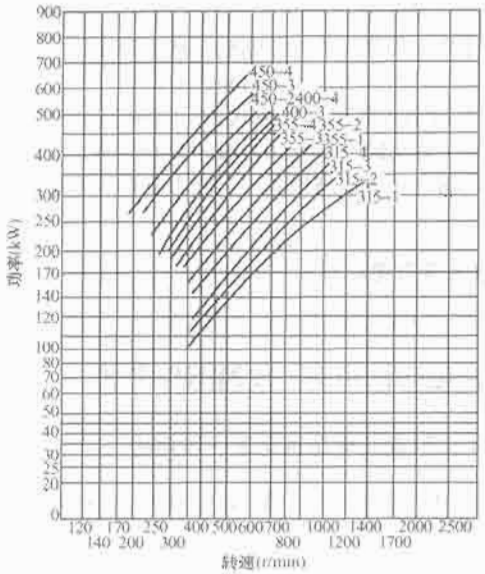


图 4.10-3 Z4-315～Z4-450 直流电动机功率--转速图

3.2 Z系列中型直流电动机功率—转速图

Z系列中型直流电动机功率与转速的关系如图 4.10-4～图 4.10-10 所示。

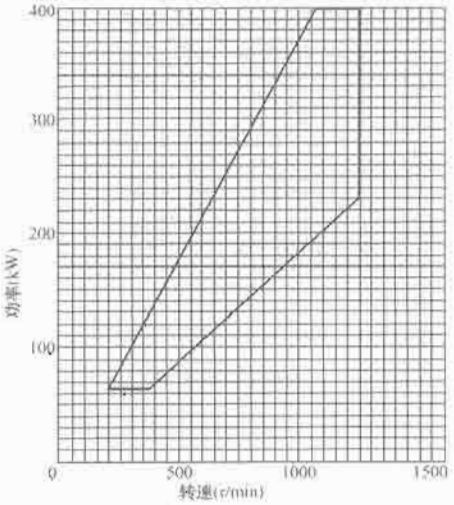


图 4.10-4 Z355 直流电动机功率—转速图

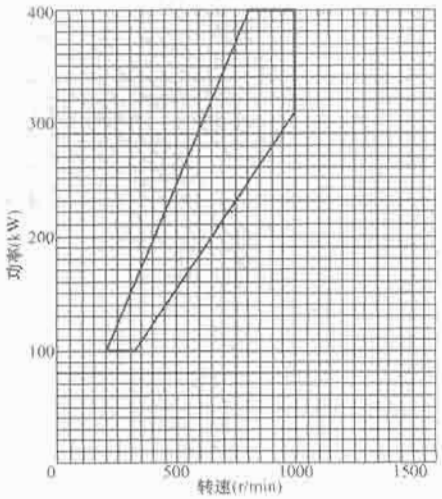


图 4.10-5 Z400 直流电动机功率—转速图

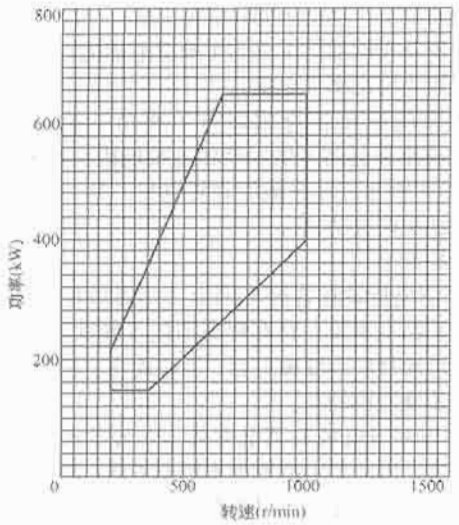


图 4.10-6 Z450 直流电动机功率--转速图

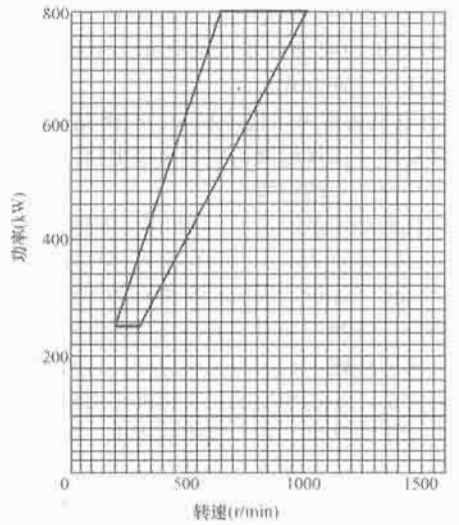


图 4.10-7 Z500 直流电动机功率—转速图

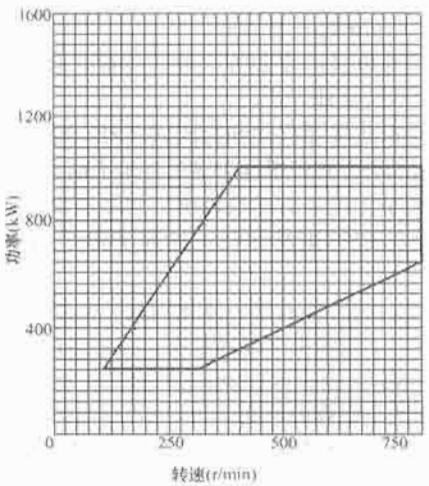


图 4.10-8 Z560 直流电动机功率--转速图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

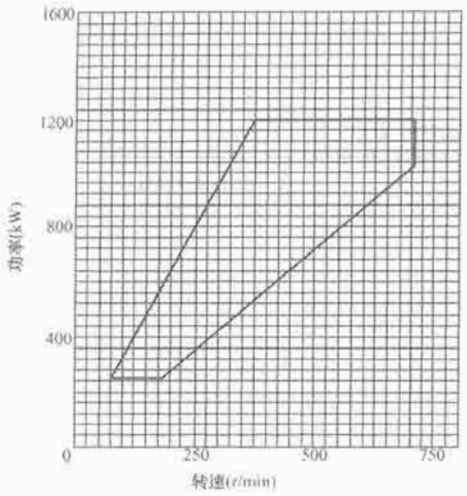


图 4.10-9 Z630 直流电动机功率—转速图

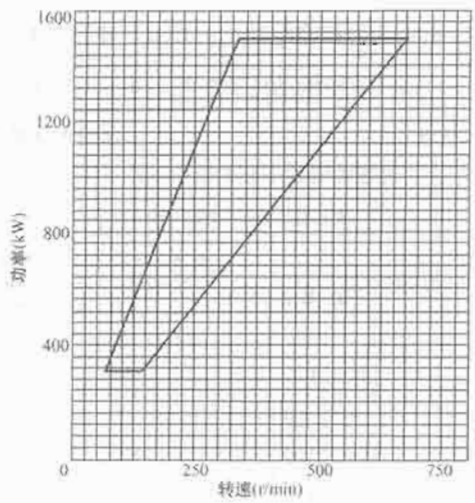


图 4.10-10 Z710 直流电动机功率—转速图

3.3 轧机用大型直流电机系列型谱

轧机用大型直流电机系列型谱见表 4.10-7 和表 4.10-8。

表 4.10-7 第一、二类直流电动机系列型谱

功率(kW)	基速(r/min)														电压(V)						
	500	450	400	355	315	280	250	225	200	180	160	140	125	112	500	560	630	710	800	900	1000
	高速(r/min)																				
1120						750	710	670	630	600	560	530	500	480							
1250					790	740	770	660	620	590	550	520	490	470							
1400				830	780	730	690	650	610	580	540	510	480	460							
1600			870	820	770	720	680	640	600	570	530	500	470	450							
1800	950	900	850	800	750	700	660	620	580	550	520	470	450	420							
2000	900	850	800	750	710	670	630	600	560	530	470	450	420	410							
2250	850	800	750	710	670	630	600	560	530	470	450	420	410	390							
2500					600	570	530	500	470	450	420	410	390	370							
2800							520	490	470	440	410	390	370	330							
3150								450	420	390	370	350	330	310							
3550								430	400	380	360	340	320	300							
4000									390	370	350	330	310	290							
4500									380	360	340	320	300	280							
5000									360	340	320	300	280	260							

表 4.10-8 第三类直流电动机系列型谱

功率(kW)	基速(r/min)												电压(V)								
	100	90	80	71	63	56	50	45	40	35.5	31.5	28	500	560	500 630	560 710	630 800	710 900	800 1000	900 1120	1000 1250
	高速(r/min)																				
1600				142	126	112	100	90	80	71	63										
1800			160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
2000		180	160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
2250	200	180	160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
2500	200	180	160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
2800	200	180	160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
3150	200	180	160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
3550	200	180	160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
4000	200	180	160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
4500	200	180	160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
5000	200	180	160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
5600		180	160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
6300			160	142	126	112	100	90	80	71	63	56									
7100				142	126	112	100	90	80	71	63	56									
8000									80	71											

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3.4 ZZJ-800 系列直流电动机的功率、电压和转速

ZZJ-800 系列直流电动机的功率、电压和转速见表 4.10-9。

表 4.10-9　　ZZJ-800 系列直流电动机的功率、电压和转速

型号	外通风 S1 或全封闭 S2 60min						全封闭串励 S2 30min		全封闭 S3 30%						最大堵转转矩 (N·m)			最大运行转矩 (N·m)		
	功率 (kW)	额定电压时的转速(r/min)					功率 (kW)	额定电压时的转速 (r/min)	串励		复励		他励							
		串励	复励	他励	他励电动机(弱磁转速)				功率 (kW)	转速 (r/min)	功率 (kW)	转速 (r/min)	功率 (kW)	转速 (r/min)	串励	复励	他励	串励	复励	他励
					220V	440V														
ZZJ-802A	3.75	900	1025	1025	2050	2050	5	750	4.1	840	3.75	1080	3.75	1130	198	157	126	158	123	102
ZZJ-802B	5.6	800	900	900	1800	1800	7.5	675	6	780	5.6	950	5.6	1000	330	270	216	268	210	177
ZZJ-802C	7.5	800	900	900	1800	1800	10	675	7.5	800	7.1	940	6.7	1000	450	360	237	360	280	220
ZZJ-803	11.2	725	800	800	2000	1600	14.1	620	11.2	725	10.8	840	10.5	880	740	610	400	600	470	360
ZZJ-804	15	650	725	725	1800	1450	19.5	580	15	650	13.8	775	12.7	800	1100	880	590	880	685	530
ZZJ-806	22.4	575	650	650	1950	1300	29	500	22.4	575	21.2	690	18.6	715	1870	1500	980	1490	1170	880
ZZJ-808	37.3	525	575	575	1725	1150	48.5	450	30	570	28	625	26	630	3400	2800	1860	2700	2150	1650
ZZJ-810	52	500	550	550	1650	1100	67	440	45	550	39	615	33.5	600	5000	4000	2700	4000	3100	2450
ZZJ-812	75	475	515	515	1300	1050	100	420	63.5	525	56	580	45	565	7450	6250	4150	6000	4900	3750
ZZJ-814	112	460	500	500	1250	1000	149	400	86	515	82	565	63.5	560	11600	9600	6400	9300	7500	5800
ZZJ-816	150	450	480	480	1200	960	200	400	112	500	104	540	82	535	16000	13300	8900	12600	10400	8000
ZZJ-818	186	410	435	435	1100	870	243	360	138	485	123	490	97	470	21700	18400	12300	17400	14400	11000
ZZJ-820	280	370	390	390	975										36100	30850	20570	28900	24000	18500
ZZJ-822	370	340	360	360	900										51960	44160	29440	41570	34350	26500
ZZJ-824	500	320	340	340	850										74600	63200	42100	59700	49100	37900

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

附录 常用符号

A—电枢线负荷(A/cm)
A_c—补偿绕组线负荷(A/cm)
A_b—电刷接触面积(mm^2)
A_{cua}—电枢线圈导线截面积(mm^2)
A_f—他(并)励线圈导线截面积(mm^2)
A_j—定子轭磁路截面积(mm^2)
A_{ja}—电枢轭磁路截面积(mm^2)
A_k—换向极线圈导线截面积(mm^2)
A_m—主极铁心磁路截面积(mm^2)
A_s—串励线圈导线截面积(mm^2)
A_{scf}—减去槽绝缘和槽楔后的槽面积(mm^2)
$A_{tc\frac{1}{3}}$—补偿齿磁路截面积(mm^2)
A_δ—主极气隙磁路截面积(mm^2)
A_ϕ—绝缘电磁线在槽内所占面积(mm^2)
a—电枢绕组并联支路对数
a_c—补偿绕组并联支路数
a_k—换向极绕组并联支路数
B_{ad}—直轴电枢反应磁通密度(T)
B_{aq}—交轴电枢反应磁通密度(T)
B_j—定子轭部磁通密度(T)
B_{ja}—电枢轭部磁通密度(T)
B_k—换向极磁场磁通密度(T)
B_m—主极极身磁通密度(T)
B_{mk}—换向极极身磁通密度(T)
$B_{mk\,max}$—换向极极身最大磁通密度(T)
B_p—主极极靴磁通密度(T)
$B_{ta\frac{1}{3}}$—矩形槽转子距转子槽底 1/3 槽高处齿磁通密度(T)
$B_{ta\frac{1}{2}}$—梨形槽转子齿磁通密度(T)
$B_{tc\frac{1}{3}}$—补偿齿磁通密度(T)
B_δ—(主极)气隙磁通密度(T)
B'_δ—(主极)气隙合成磁场磁通密度(T)
b—风扇叶片宽度(mm)
b_0—电枢槽槽口宽(mm)
b_{0c}—补偿槽槽口宽(mm)
b_b—电刷宽度(mm)
b'_b—电刷计算宽度(mm)
b_{bd}—电枢绑扎带沟宽度(mm)
b_k—换向区宽度(mm)
b_m—主极极身宽度(mm)
b_{mk}—换向极极身宽度(mm)
b'_{mk}—换向极顶部极身宽度(mm)
b_p—主极极靴弧长(mm)
b'_p—主极极靴计算弧长(mm)
$b_{p\frac{1}{3}}$—距补偿槽底 1/3 补偿槽高处的主极极靴弧长(mm)
b_{pk}—换向极极靴宽度(mm)
b_s—矩形槽电枢槽宽(mm)
梨形槽最大电枢槽宽(mm)
b_{sc}—补偿槽宽度(mm)
b_{t1}—矩形槽电枢表面齿宽(mm)
b_{t3}—矩形槽电枢槽底的齿宽(mm)
$b_{t\frac{1}{2}}$—梨形槽中部的电枢齿宽(mm)
矩形槽距槽底 1/2 槽高处的电枢齿宽(mm)
$b_{t\frac{1}{3}}$—矩形槽距槽底 1/3 槽高处的电枢齿宽(mm)
b_{sk}—电枢槽斜距(mm)
b_v—通风道(沟)宽度(mm)
C_A—电机常数
C_e—电动势常数
C_T—转矩常数
C_x—电感系数
c—比(定压)热容[J/(kg·K)]
c_a—空气的比(定容)热容[J/(m^3·K)]
c_b—电刷在换向器表面的切向错位量(mm)
D_1—离心式风扇叶片内径(mm)
D_2—离心式风扇叶片外径(mm)
D_a—电枢(铁心)外径(mm)
D_i—定子铁心内径(mm)
D_j—定子轭外径(mm)
D_k—换向器外径(mm)
d_v—电枢轴向通风孔直径(mm)
E_0—空载电动势(V)
E_a—电枢感应电动势(V)
E'_a—负载时等值电枢感应电动势(V)
e_0—短路前瞬间感应电动势标幺值
e_{aq}—交轴电枢反应电动势(V)
e_k—换向电动势(V)
e_L—漏磁自感电动势(V)
e_M—漏磁互感电动势(V)
e_r—电抗电动势(V)
e_δ—气隙磁场电动势(V)
e_t—变压器电动势(V)
e_w—旋转电动势(V)
F_a—电枢反应磁动势(A)
F_{ad}—直轴电枢反应磁动势(A)
F'_{ad}—直轴电枢反应去磁磁动势(A)
F_{aq}—交轴电枢反应磁动势(A)
F_{aqN}—额定交轴电枢反应磁动势(A)
F_c—补偿绕组磁动势(A)
F_f—励磁磁动势(A)
F_s—串励绕组磁动势(A)
F_j—定子轭磁位降(A)
F_{ja}—电枢轭磁位降(A)
F_k—换向极绕组磁动势(A)
F_{k0}—换向极磁路磁位降(A)
F_m—主极铁心磁位降(A)
F_N—额定励磁磁动势(A)
F_{ta}—电枢齿磁位降(A)
F_{tc}—补偿齿磁位降(A)
F_δ—气隙磁位降(A)
f—频率(Hz)
G—质量(kg)
GD^2—转动惯量、飞轮力矩(kg·m^2)
H—磁场强度(A/m)
H_j—定子轭部磁场强度(A/cm)
H_{ja}—电枢轭磁场强度(A/cm)
H_m—主极铁心磁场强度(A/cm)
$Ht\frac{1}{3}$—矩形槽转子距转子槽底 h_s/3 处齿磁场强度(A/cm)

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$H_{t\frac{1}{2}}$—梨形槽转子齿磁场强度(A/cm)
$H_{tc\frac{1}{3}}$—补偿齿磁场强度(A/cm)
h—换向片高度(mm)
h_0—电枢槽槽口高(mm)
h_{0c}—补偿槽槽口高(mm)
h_1—半圆槽顶电枢梨形槽的上下圆弧半径中心间的高度(mm)
梯形槽顶电枢梨形槽的最大槽宽中心与下圆弧半径中心间的高度(mm)
h_{bd}—电枢绑扎带沟高(mm)
h_{js}—电枢轭高(mm)
h'_{js}—电枢轭计算高(mm)
h_k—电枢槽楔的槽高(mm)
h_m—主极极身高(mm)
h_{mk}—换向极极身高(mm)
h'_{mk}—换向极顶部极身高(mm)
h_{pk}—换向极极靴高(mm)
h_s—电枢槽高(mm)
h_{sc}—补偿槽槽高(mm)
I—电流(A)
I_0—空载电流(A)
I_a—电枢电流(A)
I_{aN}—额定(电枢)电流(A)
I_{av}—脉动电流平均值(A)
I_{cr}—临界电流(A)
I_{ef}—脉动电流有效值(A)
I_f—励磁电流(A)
I'_f—有效励磁电流(A)
I''_f—电枢反应去磁励磁电流(A)
I_{fN}—额定励磁电流(A)
I_{fw}—励磁电流稳态值(A)
I_{max}—最大电流(A)
I_{min}—最小电流(A)
I_N—额定电流(A)
I_{st}—起动电流(A)
i_a—电枢绕组支路电流(A)
i_k—附加换向电流(A)
i_j—直线换向电流(A)
J_a—电枢线圈电流密度(A/mm²)
J_b—电刷电流密度(A/mm²)
J_c—补偿线圈电流密度(A/mm²)
J_f—励磁线圈电流密度(A/mm²)
J_k—换向极线圈电流密度(A/mm²)
J_s—串励线圈电流密度(A/mm²)
K—换向片数
K_d—气隙磁场畸变系数
K_e—励磁裕量
K_n—电枢槽齿截面比
K_s—磁路饱和系数
$K_{t\frac{1}{2}}$—电枢齿中部磁通密度系数
$K_{t\frac{1}{3}}$—矩形槽转子距转子槽底 $h_s/3$ 处磁通密度系数
K_{t3}—矩形槽齿根磁通密度系数
K_{wi}—电流波形因数
K_δ—气隙系数
$K_{\delta 1}$—电枢槽气隙系数
$K_{\delta 2}$—补偿槽气隙系数
$K_{\delta 3}$—径向通风沟气隙系数
$K_{\delta 4}$—电枢绑扎带沟气隙系数
$K_{\delta k}$—换向极气隙系数
K_{Fe}—铁心叠装系数
K_{Fem}—主极铁心叠装系数
k_s—槽满率(%)
k_β—与 u、ε_k 和 β 有关的系数
L_a—电枢电路电感(H)
L_f—主极励磁绕组电感(H)
l_j—定子轭磁路长度(cm)
l_{js}—电枢轭磁路长度(cm)
l_m—主极铁心磁路长度(cm)
L_p—声压级(dB)
l_{ta}—电枢齿磁路长度(cm)
l_{tc}—补偿齿磁路长度(cm)
L_w—声功率级(dB)
l_δ—主极气隙磁路长度(cm)
l_a—电枢铁心长度(mm)
l_e—半匝电枢线圈的端部长(mm)
$l_{a\,max}$—最大电枢铁心长度(mm)
l_b—电刷长度(mm)
l_k—换向器长度(mm)
l_j—定子轭长度(mm)
l_m—主极极身长(mm)
l_{mf}—励磁线圈平均匝长(mm)
l_{mk}—换向极极身长度(mm)
l_p—主极极靴长(mm)
l_{pk}—换向极极靴长度(mm)
M_0—蜗卷弹簧的力矩(N·m)
m—电枢绕组重路数
风扇叶片数
m_l—叠绕组重路数
m_w—波绕组重路数
N_a—电枢绕组每元件的匝数
N_f—主极励磁绕组每极匝数
N_{vj}—实际均压线根数
N_{vjm}—全额均压线根数
N_b—刷杆数
n_0—空载转速(r/min)
n_b—每刷杆电刷数
n_{bd}—电枢绑扎带数
n_N—额定转速(r/min)
n_{max}—最高转速(r/min)
n_{min}—最低转速(r/min)
n_v—通风道(沟)数
P_0—涡流、磁滞与通风摩擦损耗(W)
P_1—输入功率(kW)
P_2—输出功率(kW)
P_a—电枢回路总损耗(W)
P_b—电刷接触损耗(W)
P_{bf}—电刷摩擦损耗(W)
P_{bfv}—总机械损耗(W)
P_{Cu}—总铜耗(W)
P_{Cua}—电枢回路铜耗(W)
P_{Cuf}—励磁回路铜耗(W)
P_{em}—电功率(kW)

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

P_{Fe}—总铁损耗(W)
P_{Feja}—电枢轭部铁损耗(W)
P_{Fep}—主极表面损耗(W)
P_{Fets}—电枢齿部铁损耗(W)
P_{fw}—摩擦与通风损耗(W)
P_N—额定功率(kW)
P_s—杂散损耗(W)
p—主极对数
Q—电枢槽数
风量(m^3/s)
Q_c—补偿槽数
Q_h—单位时间内产生的热量(W)
q—每极电枢槽数
每对主极下电枢扇形片的接缝数
R_a—电枢绕组电阻(Ω)
R_c—补偿绕组电阻(Ω)
R_{cr}—临界电阻(Ω)
R_f—励磁回路电阻(Ω)
R_k—换向极绕组电阻(Ω)
R_s—串励绕组电阻(Ω)
r_0—梨形槽顶部圆弧半径(mm)
r_x—梨形槽底部圆弧半径(mm)
S—电枢绕组元件总数
s—电枢铁心每周扇形片数
T_0—涡流、磁滞与通风摩擦阻转矩(kN·m)
T_1—输入转矩(kN·m)
T_2—输出转矩(kN·m)
T_a—电枢电路时间常数(s)
T_{em}—电磁转矩(kN·m)
T_f—励磁电路时间常数(s)
T_k—换向周期(s)
T_m—机电时间常数(s)
T_{max}—最大转矩(kN·m)
T_{min}—最小转矩(kN·m)
T_N—额定转矩(kN·m)
T_s—转过一换向片节距的时间(s)
T_{st}—起动转矩(kN·m)
t—电枢绕组闭路数时间(s)
t_a—电枢表面的电枢齿节距(mm)
$t_{a\frac{1}{2}}$—矩形槽距槽底1/2槽高处的电枢齿节距(mm)
梨形槽槽中部的电枢齿节距(mm)
$t_{a\frac{1}{3}}$—矩形槽距槽底1/3槽高处的电枢齿节距(mm)
t_c—补偿槽节距(mm)
t'_c—边缘补偿槽节距(mm)
t_k—换向片节距(mm)
t_v——电枢径向通风沟节距(mm)
U—端电压(V)
U_0—空载电压(V)
U_f—励磁电路电压(V)
U_{fN}—额定励磁电压(V)
U_{k0}—空载时最大片间电压(V)
U_{kav}—平均片间电压(V)
U_{kmax}—负载时最大片间电压(V)
U_N—额定电压(V)
U_R—剩磁电压(V)
u—电枢槽内每槽元件数
u_a—电枢槽内同槽短距元件数
u_b—电枢槽内同槽长距元件数
v_a—电枢圆周速度(m/s)
v_k—换向器表面线速度(m/s)
X_c—补偿度(%)
Y—电枢绕组元件合成节距(mm)
Y_1—电枢绕组元件第一节距(mm)
Y_{1L}—叠绕组元件第一节距(mm)
Y_{1w}—波绕组元件第一节距(mm)
Y_2—电枢绕组元件第二节距(mm)
Y_{2L}—叠绕组元件第二节距(mm)
Y_{2w}—波绕组元件第二节距(mm)
Y_k—电枢绕组元件换向器节距(mm)
Y_{kL}—叠绕组元件换向器节距(mm)
Y_{kw}—波绕组元件换向器节距(mm)
Y_{e1}—电枢绕组元件均压线节距(mm)
Z—电枢绕组总导体数
Z_c—每极补偿导体数
Z'_c—要求每极补偿导体数
z_c—每槽补偿导体数
z'_c—要求每槽补偿导体数
α—位移(mm)
α_s—表面传热系数[W/(m²·K)]
α_δ—主极极弧系数
β—计算电刷覆盖片数
Δn_N—固有转速调整率(%)
ΔU—前后刷边接触电压降之差(V)
ΔU_b—正负电刷接触电压降(V)
ΔU_N—固有电压调整率(%)
θ—温升(K)
θ_0—起始温升(K)
θ_∞—稳定温升(K)
δ—主极气隙长度(mm)
δ_k—换向极气隙长度(mm)
δ_{k1}—换向极第一气隙长度(mm)
δ_{k2}—换向极第二气隙长度(mm)
ε—换向器容许的径向磨损量
η—效率(%)
η_N—额定效率(%)
ξ—换向元件平均比漏磁导平均值系数
λ—电枢长度与直径的比
λ_e—电枢绕组端部比漏磁导
λ_s—电枢槽比漏磁导
λ_t—电枢齿顶比漏磁导
ε_r—相对介电常数
ε_k—以换向片数表示的电枢绕组元件短距数
ε_s—以槽数表示的电枢绕组元件短距数
μ—电流脉动率(%)
μ_0—空气磁导率(H/m)
ρ—导线电阻率(Ω·mm²/m)
σ—主极漏磁系数
σ_0—无纬带自身质量产生的应力(MPa)
σ_1—电枢绕组端部无纬带应力(MPa)
σ_2—电枢绕组铁心部位无纬带应力(MPa)
σ_d—电枢绕组端部无纬带总应力(MPa)

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

σ_k—换向极漏磁系数
σ_p—主极补偿齿部分的极靴漏磁系数
τ—主极极距(mm)
$\sum e$—换向元件内的合成电动势(V)
$\sum F$—主极励磁安匝(A)
$\sum L_a$—包括附加电感的电枢电路总电感(H)
$\sum GD^2$—轴系折算到电动机轴上的转动惯量(kg·m²)
$\sum P$—总损耗(W)
$\sum R_a$—包括附加电阻的电枢电路总电阻(Ω)
$\sum R_f$—包括附加电阻的励磁电路总电阻(Ω)
Φ—主极气隙磁通(Wb)
Φ_0—空载主极气隙磁通(Wb)
Φ_k—换向极气隙磁通(Wb)
Φ_{ak}—换向极漏磁通(Wb)
Φ_1—主极漏磁通(Wb)
Φ_{lk}—换向极漏磁通(Wb)
Φ_{mk}—换向极极身磁通(Wb)
Φ_N—额定主极气隙磁通(Wb)
ω—角速度(rad/s)

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

参考文献

[1] 电机工程手册编辑委员会. 电机工程手册:电机卷. 北京:机械工业出版社,1979.

[2] 电机工程手册编辑委员会. 电机工程手册:电机卷. 第2版. 北京:机械工业出版社,1996.

[3] 刘启新主编. 电机与拖动基础. 北京:中国电力出版社,2005.

[4] 任兴权. 电力拖动基础. 北京:冶金工业出版社,1980.

[5] Stibler M. EinVerfahen zur Berechnung der Kommutierungsströme und Bürstenspannungen von Gleichstrommaschnen. Archiv für Elektrotechnik, 1983 (Vol 66), No 516.

[6] Richter R. Elektrische Maschinen Band 1: Allgemeine Be-rechnunselemente. Die Gleichstrom Maschinen. Basel, Stuttgart: Birkhaüser, 1967.

[7] Гурин ЯС, Курочкин М Н. Проектирование машин постоянного тока. Москва-Ленин рад: ГЭИ, 1961.

[8] 冯永年主编. 电机的工业试验. 北京:机械工业出版社,1990.

[9] Ипатов П М. Многоходовые обмоти якорей электрических машин постоянного тока. Москва-Ленин рад: Издате-лъство "Наука", 1965.

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第5篇 特种电机

主编单位：沈阳工业大学
西安微电机研究所
哈尔滨工业大学
主　　编：唐任远　莫会成　陆永平
编写人员：莫会成（西安微电机研究所）
常力彬（西安微电机研究所）
郭巧彬（西安微电机研究所）
陆永平（哈尔滨工业大学）
唐任远（沈阳工业大学）
韩雪岩（沈阳工业大学）
王益全（沈阳工业大学）
安忠良（沈阳工业大学）
陈丽香（沈阳工业大学）
伍云山（广州电器科学研究院）
谭顺乐（西安微电机研究所）
邵晓强（西安微电机研究所）
白新力（西安微电机研究所）
董超奎（西安微电机研究所）
张朝晖（西安微电机研究所）
詹琼华（华中科技大学）
刘新正（西安交通大学）
苏少平（西安交通大学）
仵均科（西安微电机研究所）
叶云岳（浙江大学）
谭作武（中国科学院电工研究所）
桂竞存（中国科学院电工研究所）
张　侠（西安微电机研究所）
樊君莉（西安微电机研究所）
荆仁旺（西安微电机研究所）
闵　琳（西安微电机研究所）
牒正文（西安微电机研究所）
胡敏强（东南大学）
梁得亮（西安交通大学）

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第1章 概 论

1 概述

随着工业进步和科学技术的发展，社会生产力水平有了极大提高，目前人类社会已进入信息化和智能化时代。与此同时，作为工业传动、运输机械（主要是汽车工业）、家用电器及国防领域等使用的电机技术也因能量转换的高效化和运动控制的智能化要求而发生着深刻变化。无论是励磁磁场的产生方法，还是在精密电气传动中具有伺服控制功能的机电一体化电机，甚至是非传统电磁原理的各种新原理电机都取得了明显的进步和突破。电机技术的发展和应用已成为现代社会文明最基本的支撑技术之一。

特种电机并非过去概念的大、中、小电机的自然延伸，而是已逐渐形成具有独立的技术体系、产业体系和技术标准，并且是应用日益广泛的电机门类，已经成为电机技术领域中最具发展潜力和最活跃的分支。因此，与传统感应电机、同步电机、直流电机相比，在工作原理、励磁方式、技术性能或功能以及在结构上有较大特点的电机统称为特种电机。

与传统电机相比较，特种电机所具有的独立性和特殊性主要表现在以下三方面：

(1) 功能多样性

功能多样性是特种电机区别于其他类别电机的重要标志之一，特别是伺服控制类电机，因为新型控制理论和电力电子技术的发展、新材料的应用以及运动控制的需要，其功能不断增强。它不仅能提供更高转换效率的动力源，而且能提供伺服控制所需的加减速运行和定位控制、自动调节、自适应和智能化等各种强大的控制功能。例如数控机床的主轴传动，用矢量控制的感应式伺服电动机代替三相感应电动机，直接把主轴电机与主轴连接成一体后装入主轴部件，主轴转速将大大提高。目前高速加工中心主轴最高转速达 80000 r/min。数控机床进给系统采用正弦波永磁交流伺服电动机后，运动速度不但由原来的每分钟几米提高到 240m/min，而且定位精度可达到 0.1μm，电动机的速度调节范围可达 1∶10000以上，大大提高了加工精度和生产效率。如在装有高精度伺服电动机的立式加工中心上用陶瓷刀具加工一个 NAC55 钢模具只需 13min，而在普通机床上需 9h。而永磁交流伺服电动机由原来的电动机本体发展成带有速度传感器、位置传感器和制动器的机组，其位置传感器每转最高可产生 100 万个脉冲，具有鲜明技术特征。

(2) 环境要求特殊

应用在航空航天、舰船、野外作业、矿山等工业领域的特种电机，不仅在功能上有特殊要求，而且还要求满足一些特殊环境条件要求，如高低温、高冲击、强振动、超高速、低气压等。例如，超高速数控铣床要求主轴电动机的转速高达 100000r/min，有些则要求电动机几小时甚至几天转 1r；有些要求电机耐受高温达 200℃，低温 −55℃，绝缘等级为 H 级以上；有些场合要求电动机耐冲击振动达 30000g；有些航天产品要求电机具有十分高的密封性能；有的电子设备则要求电机具有防辐射、防漏磁和较严格的电磁兼容功能等。这些特殊要求使电机设计的难度加大，而制造工艺的难度更是普通电机所不及的。

(3) 新理论、新技术和新材料促进了特种电机快速发展

从 20 世纪 30 年代开始，直流伺服调速系统就逐步得到了应用，几乎同时也开始了无换向器电机控制系统的研究。20 世纪末，迅速发展的电力电子技术、微电子技术、计算机技术和现代控制理论赋予电机新的生命，不仅使交流传动的控制性能可与直流传动相媲美，而且产生了诸如永磁无刷直流电动机、交流伺服电动机、开关磁阻电动机、无刷双馈电动机等一系列有别于传统电机的新型特种电机。

从 20 世纪 20 年代 Park 提出电机坐标变换理论，到 1969 年 Hasse 提出矢量控制概念，1971 年 Blaschke 完善交流电机矢量控制理论，引起了交流电机调速控制的划时代变革，为高性能的交流传动控制奠定了理论基础。

1985 年 Depenbrock 提出了直接转矩控制，它利用观测器直接在定子坐标系观测感应电机的电磁转矩和定子磁链。采用闭环控制直接控制电磁转矩和定子磁链，不需要进行复杂的坐标变换，也不需要依赖转子数学模型，只要对输入量进行比较，便可得到逆变器开关状态的信号，实现转速控制。矢量控制理论和直接转矩控制亦可直接运用到永磁无刷直流电动机、永磁交流伺服电动机等多种伺服电机。但直接转矩控制中，低速时转矩和磁链的观测及转矩的波动还没有很好解决，成为当前和今后研究的方向。

针对矢量变换控制中转子参数随温度变化和转差率变化难以准确测量而影响电机控制性能的问题，产生了基于参数辨识的模型参考自适应控制和滑模变结构控制，提高了系统对参数和模型的鲁棒性。接着又出现了以专家系统、模糊逻辑和神经网络为基础的人工智能控制和基于现代控制理论的非线性控制，进一步提高了交流伺服传动系统的性能。所有这些新的控制理论和方法，不仅适合一般的交流系统，也同样适用于提高磁阻类电机的伺服控制性能。

由于电力电子技术的进步、计算机技术的普及应用、现代控制理论的不断完善，大大改变了电机的传统面貌，从而使交流电机调速系统逐渐从传统的电机中分离出来，成为特种电机中最具特色的机种之一。

新材料的不断开发和应用促进了特种电机的发展。稀土永磁材料的迅速发展促进了高性能钕铁硼永磁电动机不断涌现，尤其是纳米晶复合永磁材料的出现，将稀土永磁电动机的研究和发展推向一个新的阶段。为了满足各种应用的要求，适应永无止境的技术进步，不断开发新型结构、采用新型材料、改进加工工艺仍是特种电机技术发展的重点，如轴向盘式结构、拼块组合结构、片状绕组等，而高性能稀土永磁、陶瓷合金、实心导磁体、高强度工程塑料等新型材料的广泛应用对特种电机产品的技术变革，具有深远的影响。

2 种类和主要特点

特种电机发展很快，种类繁多，而且不断产生新的品种和规格，因此不论是从原理、结构，还是从功能、使用等方面进行比较严格的划分都是比较困难的。综合业界的各种观

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

点和认识，大概可划分为如下几大类：永磁电机、伺服驱动与控制类电机、磁阻类电机、信号检测类电机和非传统电磁原理电机等。

2.1 永磁电机

电机是以磁场为媒介进行机械能和电能相互转换的电磁装置。在电机内建立进行机电能量转换所必需的气隙磁场有两种方法：一种是在电机绕组内通过电流来产生磁场。另一种是由永磁体来产生磁场。用永磁体来产生励磁磁场的电机称为永磁电机。在特种电机中，永磁电机使用最为广泛、产量也最大，占特种电机总量的85%以上。永磁电机历史悠久，但真正的发展是近年来随着高性能稀土永磁材料的发展而发展起来的。目前，稀土永磁电机的单台容量已超过1000kW，最高转速已超过300000r/min，最低转速低于0.01r/min，最小电机的外径只有0.8mm，长度为1.2mm。永磁电机主要包括永磁直流电动机、永磁同步电动机、永磁同步发电机、永磁无刷直流电动机、永磁步进电动机和永磁直线电动机等。

与传统的电磁电机相比，永磁电机，特别是稀土永磁电机，具有结构简单、运行可靠、体积小、质量轻、损耗小、效率高等显著优点，并且其形状和尺寸可以灵活多样，因而应用范围极为广泛。

2.2 伺服驱动与控制类电机

伺服驱动与控制类电机最早是因军事装备的需要而发展起来的。随着电力电子技术、计算机技术、新材料技术、控制理论的不断发展进步，以及装备系统对电机控制的速度、精度和实时性要求的不断提高，伺服驱动与控制类电机得到了空前的发展。与传统电机相比，伺服驱动与控制类特种电机是根据现代运动控制的需要，以电磁理论为基础，主要研究一组特定的输入控制变量和输出被控制变量之间的关系，此类电机主要包括矢量控制感应电动机、开关磁阻电动机及驱动器、永磁交流伺服电动机及系统、永磁无刷直流电动机及控制器、步进电动机及驱动器、有限转角电动机、直线电动机、磁滞电动机、交直流两用电动机等。伺服驱动与控制类电动机的主要特点是：

1）因控制的需要，尤其是因运动控制（工业进步）而产生，或为了适应控制的要求而改变电机的功能特性。

2）输入和输出均为可控变量，很多情况下通过控制系统而相互关联。

3）理论分析、研究复杂，不仅需要电磁基本理论，而且涉及控制理论、电力电子技术、计算机技术、集成电路技术和新材料技术等多门学科。

4）具有系统性和集成性，技术含量高。

5）由于大多采用电力电子装置供电，故损耗研究相对复杂。

2.3 磁阻类电动机

磁阻类电动机的运行通俗地讲是电磁铁的原理。其结构特点使磁阻随着转子的旋转角度而变化，自感和互感都是旋转角度的函数。磁阻电动机储存的磁能随着转子的旋转角度位置而变化，按照适当的时序向绕组提供电流即可产生转矩。

本篇所述磁阻电动机有开关磁阻电动机及驱动器、步进电动机及驱动器、低速同步电动机三大类。

磁阻类电动机的特点主要是：

1）发热集中在定子上，转子发热少。

2）转子为凸极，结构简单、牢固，耐热性好。

3）绕组简单，多为集中绕组。

4）励磁调节简单。

开关磁阻电动机结构简单，有较大的比功率，但转矩波动大，易产生振动和噪声；电机数学模型不明确；控制复杂。低速同步电动机有较大的自整步能力，转矩波动小，数学模型明确，但转子制造相对复杂。步进电动机可用于开环位置控制，系统简单，但低频时容易产生振荡、失步，采用细分驱动技术可减少失步，但控制较复杂。

2.4 信号检测类电机

信号检测类电机是输入和输出呈某种严格函数关系的一类特种电机，其主要功能就是将运动物体的速度或位置等转换成电信号。这类电机主要有自整角机、旋转变压器、感应移相器、感应同步器、轴角编码器、测速发电机、电机扩大机等。近年来，高精度、高可靠性的无刷自整角机、旋转变压器、感应移相器、测速发电机，以及多极和双通道自整角机、旋转变压器、感应移相器，磁阻式自整角机和旋转变压器、微动同步器等特殊原理及特殊要求的信号检测类特种电机市场日趋扩大。这类电机广泛应用于导弹、火箭、人造卫星、宇宙飞船、舰船、飞机、自行火炮、雷达、战车等武器装备中，用作各类自动化装置的定位、位置传感与指示、坐标变换与解算、速度解算与反馈。在工业自动化方面，则越来越多地用于自动控制、遥控、遥测和自动监控系统中的检测和解算。

这类电机具有体积小、重量轻、精度高、可靠性高、工作寿命长并能承受恶劣环境等特点。由于功能的不同、励磁方式的不同、电流种类的不同、安装方式的不同、冷却方式的不同以及环境条件要求的不同等，信号检测类特种电机种类繁多、零部件多、结构精密、复杂多样，和其他信号检测用传感器相比，这类电机具有很好的电磁兼容性能和耐受恶劣环境条件的能力。

2.5 非传统电磁原理电机

从工作原理来看，有些特种电机已经突破了传统电机理论的范畴。传统电机是以磁场为媒介进行机电能量转换的电磁装置。而随着现代科学技术的飞速发展，近年来借助微电子技术、精密机械技术、新材料技术、生物技术以及计算机技术等开发研究出许多基于新原理的特种电机。如超声波电机、微波电动机、静电电机、磁致伸缩驱动器、非晶合金电机、分子电动机、光热电机、仿生电机、记忆合金电机等。

3 特种电机的基本技术标准和技术要求

随着应用领域的发展和进步，现代自动控制系统对特种电机提出了越来越高的要求。这些要求不仅要考虑稳态特性，也要考虑其动态特性；不仅要考虑控制特性，而且要考虑其多功能化；不仅要考虑耐受恶劣环境的特性，还要考虑一些特殊的指标要求；不仅需要维护使用方便，更要高可靠性地满足使用要求。尤其是随着大量机械电子装备向便携式、小型化方向发展，促使电机不断地提高其功率密度、转矩密度及效率。从保护地球环境出发，人们强烈呼吁在工业化进程中一定要考虑节省资源、抑制废弃物的排出量、节约能源等问题，因此，电机的高效率和循环再利用等技术成为社会需求。

由于各类特种电机的功能特性和应用领域不同，因而对

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

其技术要求也有所不同。相对而言，特种电机的技术标准还在不断地发展和完善之中。目前较成熟并具代表性的通用性技术标准有：

1）国家标准 GB/T 7345《控制微电机基本技术要求》。

2）国家标准 GB 18211《微电机安全通用要求》。

3）国家军用标准 GJB 361A《控制电机通用规范》。

4）国家标准 GB/T 5171《小功率电动机通用技术条件》。

5）国家军用标准 GJB 783A《驱动微电机通用规范》。

6）国家标准 GB 12350《小功率电动机的安全要求》。

据不完全统计，其他有关特种电机的国家标准、国家军用标准、行业标准、专用标准达百种以上。

4 应用领域

特种电机应用遍及信息处理、音响设备、汽车电气设备、国防、航空航天、工农业生产、日常生活的各个领域。表5.1-1是特种电机的市场分布情况。

表 5.1-1 特种电机市场状况

使用领域	所占比例（%）
信息处理器	29
汽车电气设备	13
视频图像处理	7
武器系统、宇航、农业、轻工纺织、医疗器械、包装机械	20
音响设备	18
家用电器	8
工业控制	2
其他	3

4.1 电气伺服传动领域

在要求速度控制和位置控制（伺服）的场合，特种电机的应用越来越广泛。开关磁阻电动机、永磁无刷直流电动机、步进电动机、永磁交流伺服电动机、永磁直流电动机等都已在数控机床、工业电气自动化、自动生产线、工业机器人以及各种军、民用装备等领域获得了广泛应用。如交流伺服电机驱动系统应用在凹版印刷机中，以其高控制精度实现了极高的同步协调性，使这种印刷设备具有自动化程度高、套准精度高、承印范围大、生产成本低、节约能源、维修方便等优势。在工业缝纫机中，随着永磁交流伺服电动机控制系统、无刷直流电动机控制系统、混合式步进电动机控制系统的大量使用，使工业缝纫机向自动化、智能化、复合化、集成化、高效化、无油化、高速化、直接驱动化方向快速发展。

4.2 信息处理领域

信息技术和信息产业以微电子技术为核心，通信和网络为先导，计算机和软件为基础。信息产品和支撑信息时代的半导体制造设备、电子装置（包括信息输入、存储、处理、输出、传递等环节）以及通信设备（如硬盘驱动器、光盘驱动器、软盘驱动器、打印机、传真机、复印机、手机等）使用着大量各种各样的特种电机。信息产业在国内外都受到高度重视，并获得高速发展，信息领域配套的特种电机全世界年需求量约为15亿台（套），这类电机绝大部分是永磁直流电动机、无刷直流电动机、步进电动机、单相感应电动机、同步电动机、直线电动机等。

4.3 交通运输领域

目前，在高级汽车中，为了控制燃料和改善乘车舒适感以及显示装置状态的需要，要使用40～50台电动机，而豪华轿车上的电机可达80多台，汽车电气设备配套电机主要为永磁直流电动机、永磁步进电动机、无刷直流电动机等。作为21世纪的绿色交通工具，电动汽车在各国受到普遍重视，电动车辆驱动用电机主要是大功率永磁无刷直流电动机、永磁同步电动机、开关磁阻电动机等，这类电机的发展趋势是高效率、高出力、智能化。国内电动自行车近年来发展迅猛，2005年产量已超过1000万辆，预计未来将以每年15%左右的速度增长，电动自行车主要使用线绕盘式永磁直流电动机和永磁无刷直流电动机驱动；此外，特种电机在机车驱动、舰船推进中也得到了广泛应用，如直线电动机用于磁悬浮列车、地铁列车的驱动。

4.4 家用电器领域

目前，工业化国家一般家庭中约使用50～100台特种电机，电机主要品种为：永磁直流电动机、单相感应电动机、串励电动机、步进电动机、无刷直流电动机、交流伺服电动机等。为了满足用户越来越高的要求和适应信息时代发展的需要，实现家用电器产品节能化、舒适化、网络化、智能化，家用电器的更新换代周期很快，对配套的电机提出了高效率、低噪声、低振动、低价格、可调速和智能化的要求。家用电器行业用电机正进行着更新，以高效永磁无刷直流电动机为驱动的家用电器正代表着家用电器业发展的方向，如目前流行的高效节能变频空调和冰箱就采用永磁无刷直流电动机驱动其压缩机及风扇，洗衣机采用低噪声多极扁平永磁无刷直流电动机，可省去原有的机械减速器而直接驱动滚筒，实现无级调速，是目前洗衣机中的高档产品。吸尘器中采用永磁无刷直流电动机替代原用的单相串励电动机，具有体积小、效率高、噪声低、寿命长等优点。

4.5 消费电子领域

电唱机、录音机、VCD视盘和DVD视盘等影音设备以及高级智能玩具和娱乐健身设备配套电机主要为永磁直流电动机、印制绕组电动机、线绕盘式电动机、无刷直流电动机等。录像机、摄像机、数码照相机等电子消费品需要量大，产品更新换代快，这类产品所配电机属精密型，制造加工难度大，尤其是进入数字化后，对电机提出了更新、更高的要求。

4.6 国防领域

军用特种电机及组件产品门类繁多，规格各异，有近万个品种，其基本功能有：机械位置传感与指示，信号变换与计算，运动速度检测与反馈，运动装置驱动与定位，速度、加速度、位置精确伺服控制，计时标准及小功率电源等。基于其特殊性能、特殊功能和特殊工作环境的要求，大量吸收相关学科的最新技术成就，特别是新技术、新材料和新工艺的应用，催生了许多新结构、新原理电机，具有鲜明的微型化、数字化、多功能化、智能化、系统化和网络化特征。如传统鱼雷舵机均采用液压机械式驱动系统驱动舵面，为鱼雷提供三轴动力以控制航向、深度与横滚，实现所设计的鱼雷弹道；目前国内外新型鱼雷已经采用电舵机，早期电舵机多使用有刷直流伺服电动机，但有刷伺服电动机固有的缺点给电舵机系统的可靠运行带来了诸多问题。而应用体积小、质

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

量轻、功率密度大、力能指标高并具有良好伺服性能和动态特性的稀土永磁无刷直流电动机则很好地满足了鱼雷电舵机系统的特殊使用要求。

目前国防领域重点应用和发展的特种电机是永磁交流伺服系统；永磁无刷直流电动机；高频高精度双通道旋转变压器；微、轻、薄永磁直流力矩电动机；高精度角位传感电动机；步进电动机及驱动器；低惯量直流伺服电动机；永磁直流力矩测速机组；驱动电机加减速器组件；超声波电动机；直线和直接驱动电动机等。

4.7 特殊用途领域

一些特殊领域应用的各种飞行器、探测器、自动化装备、医疗设备等使用的电机多为特种电机或新型电机，包括从原理上、结构上和运行方式上都不同于一般电磁原理的电机，主要为低速同步电动机、谐波电动机、有限转角电动机、超声波电动机、微波电动机、电容式电动机、静电电动机等。如将一种厚度为0.4mm的超薄型超声波电动机应用于微型直升机；将微型超声波电动机应用于手机的照相系统中等。

5 发展趋势

5.1 国内外发展情况

由于人们不断地追求便利的生活环境，企业追逐大规模生产的经济效益，加上工农业生产装备的自动化、智能化、现代化的需求促进了电机技术的快速发展和进步，使得与特种电机相关的研发设计、检测技术、半导体及控制器件、轴承、磁性材料、绝缘材料、制造加工等所有技术都得到了提高和进步，而这些提高和进步促使特种电机进一步向小型轻量化、高效率化、大转矩、低振动、低噪声、高可靠性、低价格、长寿命等方向发展，使特种电机的应用扩展到更广泛的领域，日益成为许多领域的关键技术。

目前，美国、日本及欧盟代表着世界先进水平，引领着特种电机的发展，主宰着高档、精密、新型特种电机的技术和发展；美国更是军用特种电机的研制、生产和出口强国。我国特种电机行业经过40多年的发展，在技术水平、产品性能、品种规格、生产规模等方面取得了巨大的进步，并一跃成为世界特种电机生产大国，形成了为国民经济各领域提供优质服务、满足各种使用要求，同时为国际市场提供大量产品的重要基础性产业。据统计，中国目前生产特种电机的企业有上千家，从业者数十万人，每年生产各种电机达数十亿台（套），上万种规格，销售额达数百亿人民币，其中70%出口。

5.2 发展趋势

特种电机所涉及的学科和技术领域包括了电机技术、材料技术、微电子技术、电力电子技术、传感技术、计算技术、控制技术、网络技术等，属多学科、多技术领域交叉的综合技术，是典型的机电一体化产品。

5.2.1 机电一体化

现代电气伺服控制技术的发展方向表现为：电机的无刷化、传感器的数字化、电路的集成化、信息流的总线化、操作的可视化、控制的软件化以及系统的机电一体化。机电一体化就是将传统电机与电力电子技术、现代控制理论有机结合，作为一体化产品满足各类自动化装备系统的需求，最终实现智能化。目前，电机在其实际应用中已由过去简单地提供动力为目的发展到对其速度、位置和转矩等物理量进行精确控制，为了不断适应这种日益发展的智能化需求，特种电机也必然与微电子技术、计算机技术和电力电子技术等相结合构成新型机电一体化产品。从国防和航空航天到工农业生产、信息、医疗以及家庭自动化，几乎所有领域都在越来越多地采用机电一体化伺服传动系统。永磁交流伺服电动机、永磁无刷直流电动机、开关磁阻电动机等耗电少、效率高、运行成本低、控制性能好的新型机电一体化传动系统正在迅速普及。

5.2.2 高性能化

新型材料的应用为提高电机产品性能、降低成本创造了有利条件，而微电子技术、现代控制技术、计算机技术和电力电子技术的发展应用促使特种电机向高性能化不断迈进。不仅使电机的力能指标、稳态性能、动态性能大幅度提高，更使其在检测精度、控制的灵活性、控制精度、综合控制性能、可靠性等方面得到更快发展，达到精度高、频响高、灵敏度高、效率高、可靠性高、功率密度高、性能好、维护性好等。如稀土永磁的高剩余磁通密度、高矫顽力、高磁能积和线性退磁曲线等优异的磁性能特别适合于电机中的应用，引起了电机结构、设计方法、工艺等方面的变革，稀土永磁电机也因而具有一系列的独特优点：结构简单、运行可靠、体积小、重量轻、损耗小、效率高，电机的形状和尺寸可以灵活多样。随着新型电力电子器件的不断涌现，电机控制技术飞速发展，而微处理器的应用促进了模拟控制系统向数字控制系统的转化。数字化控制技术使得电机控制所需的复杂算法得以实现，并且简化了硬件设计，降低了成本，提高了精度。特别是最近几年来，工业控制的功能模块或专用芯片不断涌现，如用于电动机驱动控制的数字信号处理器(DSP)，它将一系列外围设备如模/数(A/D)转换器、脉宽调制(PWM)发生器集成在一起，为电机驱动控制提供了理想的解决方案。

5.2.3 小型化和微型化

随着信息产品和消费类电子产品向微、轻、薄方向发展，对其配套的特种电机提出了小型化和微型化的要求，而空间设施、国防装备、医疗设备等对电机进一步提出了短、小、薄、低噪声、无电磁干扰等要求。例如，小型扁平存储驱动器、微型摄像机、数码照相机、微型立体声耳机、微型收录机、手机等产品几乎都使用小型化、片状永磁无刷直流电动机。

5.2.4 大功率化

在工业传动和交通运输等领域，特种电机呈现大功率化趋势。我国开发的1120kW永磁同步电动机是目前世界上功率最大的异步起动高效稀土永磁电动机，其效率高于96.5%，功率因数达0.94，可以替代比它大1～2个功率等级的普通电动机。目前，开关磁阻电动机传动系统最大功率为5MW，最大转矩为10^6 N·m，转速可达100000r/min。我国也已经有上百千瓦的开关磁阻电动机产品。世界上已开发出3000kW等级以上的大功率稀土永磁无刷直流电动机成功用于舰船主轴驱动中。

5.2.5 非电磁化

应用相关学科的新成果，包括新原理、新材料，在对传统产品改进的同时，开发新原理电机，尤其是开发非电磁原理的特种电机已成为电机发展的一个重要方向。世界各国都在不断探索其他新型电机，如超声波电动机、静电电动机、仿生电动机、光热电动机、形状记忆合金电动机和微波电动机以及建立在微电子技术上的微机械系统等。其中，超声波电动机已在航空航天、机器人、汽车、精密定位仪、数码照相机、微型机械等领域得到成功应用。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第 2 章　永磁电机磁路计算基础

1　永磁材料的性能和选用

永磁电机的性能、设计制造特点和应用范围都与永磁材料的性能密切相关。永磁材料种类众多，性能差别很大，只有全面了解后才能做到设计合理，使用得当。

1.1　永磁材料磁性能的主要参数

1.1.1　退磁曲线

永磁材料磁滞回线（见图 5.2-1）在第二象限的部分称为退磁曲线。退磁曲线的两个极限位置是表征永磁材料磁性能的两个重要参数。退磁曲线上磁场强度 H 为零时的磁感应强度值称为剩余磁感应强度，又称剩余磁通密度，简称剩磁密度 B_r，单位为 T（工厂习惯用非法定单位为 Gs 或 G，1Gs=10^{-4}T）。退磁曲线上磁感应强度为零时的磁场强度值称为磁感应强度矫顽力，简称矫顽力 H_{cB}，常简写为 H_c，单位为 A/m[习惯用非法定单位为 Oe，1Oe=1000/(4π)A/m=79.577A/m]。

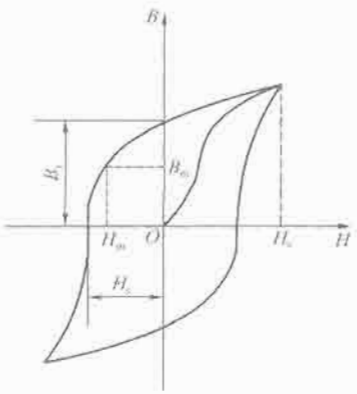


图 5.2-1　饱和磁滞回线

由于退磁曲线中，永磁体的磁通密度 B_m 为正值，而磁场强度 H_m 为负值，说明两者方向相反，磁通经过永磁体时沿磁通方向的磁位差不是降落而是升高，这就是说，永磁体是一个磁源，类似于电路中的电源。同时说明作用于永磁体的是一个退磁性质的磁场强度，即磁场强度的绝对值 $|H|$ 越大，磁感应强度 B 就越小。为表述方便起见，实用上常取 H 的绝对值，或者说，把 H 轴的正方向改变，即负轴改为正轴。

退磁曲线上任一点的磁通密度与磁场强度的乘积称为磁能积，它的大小与该永磁体在给定工作状态下所具有的磁能密度成正比。图 5.2-2 示出两种不同形状退磁曲线 1 和 2 的磁能积 (BH) 与 B 的关系曲线 3 和 4，即磁能积曲线。在退磁曲线的两个极限位置（$B=B_r, H=0$）和（$B=0, H=H_c$）磁能积为零。中间某个位置上磁能积为最大值，称为最大磁能积，符号为 $(BH)_{max}$，单位为 J/m³［习惯用非法定单位为 G·Oe，1G·Oe=1/(40π)J/m³≈8×10^{-3}J/m³ 或 1MG·Oe≈8kJ/m³］，它也是表征永磁材料磁性能的重要参数，对于退磁曲线为直线的永磁材料，显然在 $(B_r/2, H_c/2)$ 处磁能积最大，即

$$(BH)_{max}=\frac{1}{4}B_rH_c \tag{5.2-1}$$

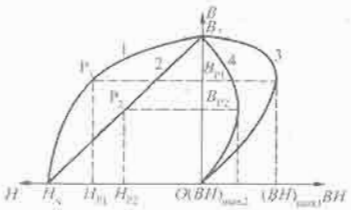


图 5.2-2　退磁曲线和磁能积曲线
1，2—退磁曲线；3，4—磁能积曲线

1.1.2　回复线

永磁电机运行时作用于永磁体的退磁磁场强度是反复变化的。当对已充磁的永磁体施加退磁磁场强度时，磁感应强度沿图 5.2-3（a）中的退磁曲线 B_rP 下降，如果在下降到 P 点时消去外加退磁磁场强度 H_P，则磁感应强度并不沿退磁曲线回复，而是沿另一曲线 PBR 上升。若再施加退磁磁场强度，则磁感应强度沿新的曲线 $RB'P$ 下降。如此多次反复后形成一个局部的小回线，称为局部磁滞回线。由于该回线的上升曲线与下降曲线很接近，可以近似地用一条直线 $\overline{PR}$ 来代替，称为回复线。P 点为回复线的起始点。如果以后施加的退磁磁场强度 H_Q 不超过第一次的值 H_P，则磁感应强度沿回复线 $\overline{PR}$ 作可逆变化。如果 $H_Q>H_P$，则磁感应强度下降到新的起始点 Q，沿新的回复线 $\overline{QS}$ 变化，不能再沿原来的回复线 $\overline{PR}$ 变化。这种磁感应强度的不可逆变化将造成电机性能的不稳定，也增加了永磁电机电磁设计计算的复杂性，因而应该力求避免发生。

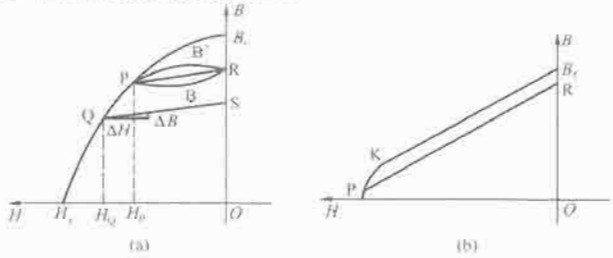


图 5.2-3　回复线

回复线的平均斜率与真空磁导率 μ_0 的比值称为相对回复磁导率，简称回复磁导率，符号为 μ_{rec}，简写为 μ_r。

$$\mu_r=\frac{1}{\mu_0}\left|\frac{\Delta B}{\Delta H}\right| \tag{5.2-2}$$

式中，μ_0 为真空磁导率，又称磁常数，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$H/m。

当退磁曲线为曲线时，μ_r 的值与起始点的位置有关，是个变数。但通常情况下变化很小，可以近似认为是一个常数，且近似等于退磁曲线上（B_r，0）处切线的斜率值。换句话说，各点的回复线可近似认为是一组平行线，它们都与退磁曲线上（B_r，0）处切线相平行。利用这一近似特性，实际工作中求取不同工作温度、不同工作状态的回复线就方便得多。

有的永磁材料，如部分铁氧体永磁的退磁曲线的上半部

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

分为直线，当退磁磁场强度超过一定值后，退磁曲线就急剧下降，开始拐弯的点称为拐点。当退磁磁场强度不超过拐点K时，回复线与退磁曲线的直线段相重合。当退磁磁场强度超过拐点后，新的回复线RP就不再与退磁曲线重合了［见图5.2-3（b）］。

1.1.3 内禀退磁曲线

磁性材料在外磁场作用下被磁化后产生的内在磁感应强度，称为内禀磁感应强度 B_i，又称磁极化强度 J。

$$J = \mu_0 M \tag{5.2-3}$$

式中，M 为磁化强度，A/m。

由铁磁学理论可知，在磁性材料中

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{M} + \mu_0 \boldsymbol{H} \tag{5.2-4}$$

在均匀的磁性材料中，上式的矢量和可改成代数和

$$B = \mu_0 M + \mu_0 H \tag{5.2-5}$$

$$B_i = \mu_0 M = B - \mu_0 H \tag{5.2-6}$$

若退磁曲线中 H 取绝对值，则式（5.2-4）可改写成

$$B_i = B + \mu_0 H \tag{5.2-7}$$

描述内禀磁感应强度 $B_i(J)$ 与磁场强度 H 关系的曲线 $B_i = f(H)$ 是表征永磁材料内在磁性能的曲线，称为内禀退磁曲线，简称内禀曲线，如图5.2-4所示。图中同时表明了内禀退磁曲线与退磁曲线之间的关系。

内禀退磁曲线上磁极化强度 J 为零时，相应的磁场强度值称为内禀矫顽力 H_{cJ}（A/m）。H_{cJ} 的值反映永磁材料抗去磁能力的大小，是表征稀土永磁抗去磁能力强弱的一个重要参数。

除 H_{cJ} 值外，内禀退磁曲线的矩形度 H_K/H_{cJ} 越大，磁性能越稳定。H_K（A/m）为内禀退磁曲线上当 $B_i = 0.9B_r$ 时所对应的退磁磁场强度值（见图5.2-4）。H_K 应为稀土永磁材料必测参数之一。

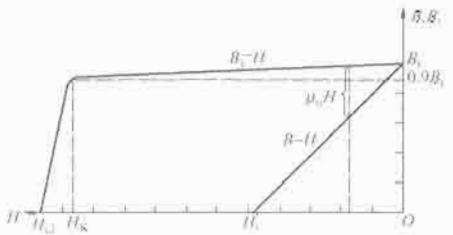


图5.2-4 内禀退磁曲线及与退磁曲线的关系

1.1.4 稳定性

通常用永磁材料的磁性能随环境、温度和时间的变化率来表示其稳定性，主要包括温度稳定性、磁稳定性、化学稳定性和时间稳定性。

1）温度稳定性。是指永磁体由所处环境温度改变而引起磁性能变化的程度，如图5.2-5所示。当永磁体的环境温度从 t_0 升至 t_1 时，磁感应强度从 B_0 降为 B_1；当温度从 t_1 回到 t_0 时，磁感应强度回升至 B'_0，而不是 B_0；以后温度在 t_0 和 t_1 之间变化，则磁感应强度在 B'_0 和 B_1 之间变化。

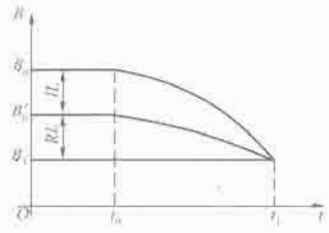


图5.2-5 可逆损失与不可逆损失

从图5.2-5可以看出，磁性能的损失可以分为两部分：

① 可逆损失是不可避免的。各种永磁材料的剩余磁感应强度随温度可逆变化的程度可用温度系数 α_{Br}（%/K）表示。

$$\alpha_{Br} = \frac{B_1 - B'_0}{B'_0(t_1 - t_0)} \times 100 \tag{5.2-8}$$

同样，还常用 α_{HcJ}（%/K）表示永磁材料的内禀矫顽力随温度可逆变化的程度。

$$\alpha_{HcJ} = \frac{H_{cJ} - H'_{cJ}}{H'_{cJ}(t_1 - t_0)} \times 100 \tag{5.2-9}$$

② 不可逆损失是温度恢复后磁性能不能恢复到原有值的部分，通常以其损失率 Π_r 表示。

$$\Pi_r = \frac{B'_0 - B_0}{B_0} \times 100\% \tag{5.2-10}$$

式中，Π_r 取绝对值。

不可逆损失又可分为不可恢复损失和可恢复损失。前者是指永磁体重新充磁也不能复原的损失。后者是指永磁体重新充磁后能恢复的损失。

永磁材料的温度特性还可用居里温度来表示。随着温度的升高，磁性能逐步降低，升至某一温度时，磁化强度消失，该温度称为该永磁材料的居里温度，又称居里点，符号为 T_c，单位为K或℃。

手册或资料中通常提供的是室温 t_0 时的剩余磁感应强度 B_{r0}，则工作温度 t_1 时的剩余磁感应强度为

$$B_{r1} = B_{r0}\left(1 - \frac{\Pi_r}{100}\right)\left[1 - \frac{\alpha_{Br}}{100}(t_1 - t_0)\right] \tag{5.2-11}$$

式中，α_{Br} 取绝对值。

2）磁稳定性。是指在施加外磁场条件下永磁体磁性能发生变化的情况。理论分析和实践证明，一种永磁材料在工作温度时的内禀矫顽力 H_{cJ1} 越大（由室温时的 H_{cJ0} 和 α_{HcJ} 决定），内禀退磁曲线的矩形度越好（或者说 H_{K1} 越大），则这种永磁材料的磁稳定性越高，即抗外磁场干扰能力越强。当 H_{cJ1} 和 H_{K1} 大于某定值后，退磁曲线全部为直线，回复线与退磁曲线重合，在外施退磁磁场强度作用下，永磁体的工作点在回复线上来回变化，不会造成不可逆退磁。

永磁电机在运行过程中，由于电机温升和电枢反应的去磁作用，需要对电机内永磁体的温度稳定性和磁稳定性结合起来研究，即永磁材料在不同工作温度下施加退磁磁场引起的磁性能变化，称为热稳定性。

3）化学稳定性。是指受酸、碱、氯气和氢气等化学因素的作用，永磁材料内部或表面化学结构发生变化的情况，这将严重影响材料的磁性能。故在生产过程中需采取各种工艺措施来防止氧化，要尽力提高永磁体的密度以减少残留气隙来提高其抗腐蚀能力，同时要在成品表面涂敷保护层，如镀锌、镀镍、电泳等。

4）时间稳定性。也叫自然时效，是指永磁材料充磁以后在通常的环境条件下，其磁性能也会随时间而变化，通常以一定尺寸形状样品的开路磁通随时间损失的百分比来表示。研究表明，它与材料的内禀矫顽力 H_{cJ} 和永磁体尺寸比 L/D 有关。对永磁材料而言，在一定温度下随时间的磁通损失与所经历时间的对数基本上呈线性关系，因此可以从一定时间内的磁通损失来推算出更长时间的磁通损失，从而判断出永磁体在一定温度下的使用寿命。

1.2 几种主要永磁材料的基本性能

1.2.1 铝镍钴永磁材料

铝镍钴永磁材料按加工工艺的不同，分铸造型和粉末烧结型两种。铸造型的磁性能较高。粉末烧结型的工艺简单，可直接压制成所需形状。在永磁电机中常用的是铸造型铝镍

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

钴永磁材料。

铝镍钴永磁材料的特点是温度系数小，α_{Br} 仅为−0.02%/K左右；剩余磁感应强度较高，最高可达1.35T；但矫顽力很低，通常小于160kA/m；它的退磁曲线呈非线性变化，如图5.2-6所示（图中虚线为等磁能积曲线）。它目前仍被广泛应用于仪器仪表类要求温度稳定性高的永磁电机中。

依据铝镍钴永磁材料矫顽力低和回复线与退磁曲线并不重合的特点，由它构成的磁路必须事先对永磁体进行稳磁处理，即事先人工预加可能发生的最大去磁效应，人为地决定回复线的起点P的位置，使永磁电机在规定的或预期的运行状态下，回复线的起始点不再下降。铝镍钴永磁电机一旦拆卸、维修之后再重新组装时，还必须进行再次整体饱和充磁和稳磁处理，否则永磁体工作点将下降，磁性能大大下降。为此铝镍钴永磁电机的磁极上通常都有极靴且备有再充磁绕组，使其可以再次充磁来恢复应有的磁性能。在使用过程中，严格禁止它与任何铁器接触，以免造成局部的不可逆退磁或磁通分布的畸变。另外，为了加强它的抗去磁能力，铝镍钴永磁磁极往往设计成长柱体或长棒形。铝镍钴永磁硬而脆，可加工性较差，仅能进行少量磨削或电火花加工，因此加工成特殊形状比较困难。

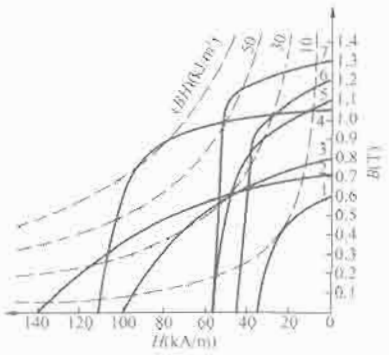


图5.2-6　铝镍钴永磁的退磁曲线
1—LN10；2—LNGT10；3—LNGT32；
4—LNGT72；5—LNG32H；6—LNG32；7—LNG52

表5.2-1列出了我国常用铝镍钴永磁材料的牌号及主要磁性能，表5.2-2列出部分牌号的物理和力学性能，仅供选用时参考。

表5.2-1　铝镍钴永磁材料牌号及其主要磁性能

牌号	剩余磁感应强度 B_r		磁感应强度矫顽力 H_c		最大磁能积 $(BH)_{max}$		B_r 温度系数 α_{Br}	回复磁导率 μ_r
	T	kGs①	kA/m	kOe①	kJ/m³	MG·Oe①	(%/K)	
LN10	0.60	6.0	36	0.45	10	1.25	−0.022	6.0~7.0
LNG13	0.68	6.8	48	0.60	13	1.6		6.0~6.7
LNG32	1.20	12.0	44	0.55	32	4.0	−0.016	3.5~4.8
LNG37	1.2	12.0	48	0.6	36.9	4.63		
LNG40	1.25	12.5	48	0.6	39.8	5.0		
LNG44	1.25	12.5	52	0.65	43.8	5.5		
LNG52	1.3	13.0	56	0.7	51.7	6.5	−0.016	2.4~3.6
LNG60	1.35	13.5	60	0.75	60	7.5		2.4~3.6
LNG32H	1.10	11.0	56	0.70	32	4.0		3.2~4.5
LNGT28	1.0	10.0	56	0.72	27.9	3.5		
LNGT32	0.80	8.0	100	1.25	32	4.0	−0.002	2.4~3.6
LNGT38	0.80	8.0	110	1.38	37.8	4.75		
LNGT40	0.72	7.2	140	1.76	40	5.0		
LNGT56	0.95	9.5	104	1.30	56	7.0	−0.02~−0.025	2.4~3.6
LNGT60	0.9	90.0	110	1.38	59.7	7.5		
LNGT70	0.90	9.0	145	1.82	70	8.8		
LNGT72	1.05	10.5	111	1.40	72	9.0	−0.02~−0.025	2.0~3.2
LNGT85	1.08	10.8	120	1.50	85	10.7		2.0~3.0
LNGT36J	0.7	7.0	139	1.75	35.8	4.5		
LNS9	0.5	5.0	35	0.44	9	1.1		6.0~6.7
LNGS25	1.03	10.5	46	0.58	27.9	3.5		3.2~4.3

注　L代表铝，N代表镍，G代表钴，T代表钛，S代表烧结。
① 为非法定计量单位。

表5.2-2　铝镍钴永磁材料部分牌号的物理和力学性能

牌　号	密度(g/cm³)	电阻率(μΩ·cm)	线胀系数(×10⁻⁶/K)	硬度 HRC	抗拉强度(MPa)
LN 10	7.0	60~65	13.0	45~47	
LNG 13	7.2	65	12.4	52	2
LNG 32	7.3	47	11.2	50	4
LNG 52	7.3	50	11.2	50	
LNGT 32	7.1	62	11.0	58~59	21
LNGT 72	7.1		11.0	58~59	
LNS 9	6.7~6.8		13.0	43	
LNGS 25	7.0	50	11.3	45	

1.2.2　铁氧体永磁材料

铁氧体永磁材料属于非金属永磁材料，在电机中常用的有两种，钡铁氧体和锶铁氧体。它们的磁性能相差不多，而锶铁氧体的 H_c 值略高于钡铁氧体，更适合于在电机中使用。

铁氧体永磁材料的突出优点是：价格低廉，不含稀土元素和钴、镍等贵重金属；制造工艺也较为简单；矫顽力较大，H_c 为140~335kA/m，抗去磁能力较强；密度小，只有4~5.2 g/cm³，质量较轻；退磁曲线接近于直线，或者说退磁曲线的很大一部分接近直线（见图5.2-7），回复线基本上与退磁曲线

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

的直线部分重合，可以不需要像铝镍钴永磁材料那样进行稳磁处理。因而在电机中应用最为广泛，是目前电机中用量最大的永磁材料。

铁氧体永磁材料的主要缺点是：剩磁密度不高，B_r 仅为0.2～0.44T，最大磁能积 $(BH)_{max}$ 仅为6.4～40kJ/m³，因而需要加大提供磁通的截面积，使电机体积增大；环境温度对磁性能的影响大，剩磁温度系数 α_{Br} 为－(0.18～0.20)%/K，矫顽力温度系数 α_{HcJ} 为(0.4～0.6)%/K。必须指出，铁氧体永磁的 α_{HcJ} 为正值，其矫顽力随温度的升高而增大。这与其他几种常用永磁材料不同。因此，铁氧体永磁材料在使用时要进行最低环境温度时最大去磁工作点的校核计算，以防止在低温时产生不可逆退磁。

另外，铁氧体永磁材料硬而脆，且不能进行电加工，仅能切片和进行少量磨削加工。通常采用软质砂轮，最好选用R_3碳化硅砂轮，并且磨削速度要适当，磨削时要用水充分冷却，这样既能加快磨削速度，又不致磨裂永磁体。

表5.2-3a、b给出了我国生产的铁氧体永磁材料的牌号及主要性能，供选用时参考。

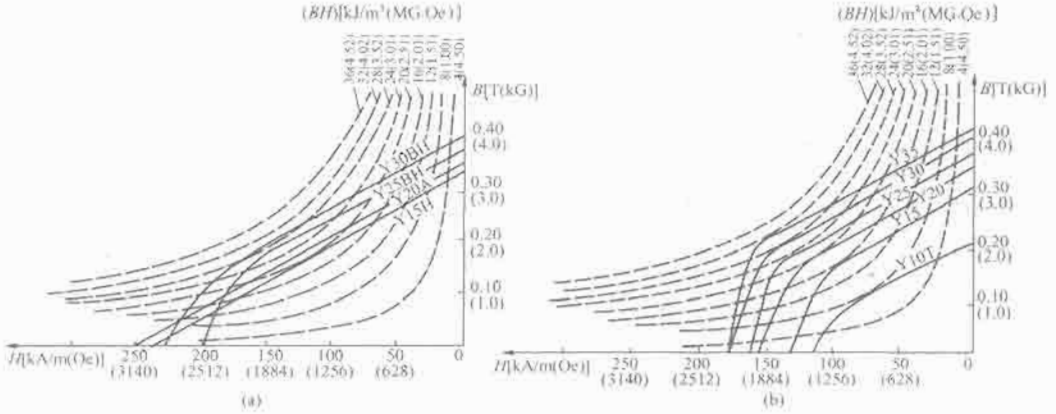


图5.2-7 铁氧体永磁的退磁曲线

表5.2-3a 铁氧体永磁材料牌号及其主要磁性能

牌号	剩余磁感应强度 B_r		磁感应强度矫顽力 H_c		内禀矫顽力 H_{cJ}		最大磁能积 $(BH)_{max}$	
	T	kGs①	kA/m	kOe①	kA/m	kOe①	kJ/m³	MG·Oe①
Y8T	0.2～0.235	2.0～2.35	125～160	1.57～2.01	210～280	2.64～3.52	6.50～9.50	0.8～1.2
Y10T	≥0.2	≥2	128～160	1.60～2.0			6.40～9.60	0.8～1.2
Y15	0.28～0.36	2.8～3.6	128～192	1.60～2.40			14.3～17.5	1.8～2.2
Y20	0.32～0.38	3.2～3.8	135～190	1.70～2.38	140～195	1.76～2.45	18.0～22.0	2.3～2.8
Y23	0.32～0.37	3.2～3.7	170～190	2.14～2.38	190～230	2.39～2.89	20.0～25.5	2.5～3.2
Y25	0.36～0.40	3.6～4.0	135～170	1.70～2.14	140～200	1.76～2.51	22.5～28.0	2.8～3.5
Y28	0.37～0.40	3.7～4.0	175～210	2.20～2.64	180～220	2.26～2.77	26.0～30.0	3.3～3.8
Y32	0.40～0.42	4.0～4.2	160～190	2.01～2.38	165～195	2.07～2.45	30.0～33.5	3.8～4.2
Y33	0.41～0.43	4.1～4.3	220～250	2.77～3.14	225～255	2.83～3.21	31.5～35.0	4.0～4.4
Y35	0.40～0.44	4.0～4.4	176～224	2.20～2.80			30.3～33.4	3.8～4.2
Y15 H	≥0.31	≥3.1	232～248	2.90～3.10			≥17.5	≥2.2
Y20 H	≥0.34	≥3.4	248～264	3.10～3.30			≥21.5	≥2.7
Y22 H	0.31～0.36	3.1～3.6	220～250	2.77～3.14	280～320	3.52～4.02	20.0～24.0	2.5～3.0
Y26 H	0.36～0.39	3.6～3.9	220～250	2.77～3.14	225～255	2.83～3.21	23.0～38.0	2.9～3.5
Y27 H	0.37～0.40	3.7～4.0	205～250	2.58～3.14	210～255	2.64～3.21	25.0～29.5	3.1～3.7
Y25BH	0.36～0.39	3.6～3.9	176～216	2.20～2.70			23.9～27.1	3.0～3.4
Y30BH	0.38～0.40	3.8～4.0	224～240	2.80～3.00			27.1～30.3	3.4～3.8
Y33BH	≥0.395	≥3.95	≥248	≥3.1			≥29.4	≥3.7
Y35BH	≥0.41	≥4.1	≥255	≥3.2			≥33.6	≥4.2
Y30H-1	0.38～0.40	3.8～4.0	230～275	2.89～3.46	235～290	2.95～3.65	27.0～32.0	3.4～4.1
Y30H-2	0.395～0.415	3.95～4.15	275～300	3.46～3.77	310～335	3.90～4.21	28.0～32.5	3.5～4.0

注 Y代表永磁，T代表各向同性。

① 为非法定计量单位。

表5.2-3b 铁氧体永磁材料的其他物理特性

密度 (g/cm³)	电阻率 (μΩ·cm)	剩磁温度系数 (%/K)	居里温度 (℃)	线胀系数 (×10⁻⁶/K)	硬度 HV
4.5～5.1	>10⁶	－0.20	450～460	7～15	480～580

1.2.3 稀土永磁材料

稀土钴永磁材料和钕铁硼永磁材料都是稀土永磁材料，但在某些性能上有较大区别，现分别加以介绍。

(1) 稀土钴永磁材料

稀土钴永磁材料是20世纪60年代中期兴起的磁性能优异的永磁材料。其特点是剩余磁感应强度 B_r、磁感应强度矫

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

顽力 H_c 及最大磁能积 $(BH)_{max}$ 都很高。1∶5 型（RCO_5）永磁体的最大磁能积现已超过 199 kJ/m³（25MG·Oe），2∶17 型（R_2CO_{17}）永磁体的最大磁能积现已超过 258.6 kJ/m³（32.5MG·Oe）。剩余磁感应强度 B_r 一般高达 0.85～1.15T，磁感应矫顽力 H_c 可达 480～800kA/m，大约是铁氧体永磁材料的 3 倍。稀土钴永磁材料的退磁曲线基本上是一条直线，回复线基本上与退磁曲线重合，抗去磁能力强。另外稀土钴永磁材料 B_r 的温度系数通常为－0.03%/K 左右，并且居里温度较高，一般为 710～880℃。因此，它适合用来制造各种高性能的电机。缺点是目前的价格还比较昂贵，致使电机的造价较高；由于稀土钴永磁材料硬而脆，抗拉强度和抗弯强度均较低，仅能进行少量的电火花或线切割加工，所以在永磁体尺寸的设计上要避免过多的加工余量，以免造成浪费和增加成本。其次由于这种永磁材料的磁性很强，磁极相互吸引力和排斥力均很大，因此磁极在充磁后运输和装配时都要采取措施，以免发生人身危险。

表 5.2-4 是国产稀土钴永磁材料的部分牌号及主要性能，供选用时参考。

（2）钕铁硼永磁材料

钕铁硼永磁材料是 1983 年问世的，室温下剩余磁感应强度 B_r 现可达 1.49T，磁感应强度矫顽力 H_c 可达 1035kA/m（13.0kOe），最大磁能积高达 422kJ/m³（53MG·Oe），是目前磁性能最高的永磁材料，而其价格比稀土钴永磁材料便宜得多，问世以来在国防、工业和民用的电机中迅速得到推广应用。

钕铁硼永磁材料的不足之处是居里温度较低，一般约为 310～410℃；温度系数较高，B_r 的温度系数为－（0.100～0.126）%/K，H_{cJ} 的温度系数为－（0.45～0.60）%/K，因而在高温下使用时磁损失较大；容易锈蚀，所以要对其表面进行涂层处理，目前常用的涂层有电镀锌、电镀镍、电泳和磷化等，一般涂层厚度为5～26μm。

另外，由于钕铁硼永磁材料的温度系数较高，一般在高温下使用时，其退磁曲线的下半部分要发生弯曲，如图5.2-8（a）和（b）所示，为此一定要校核永磁体的最大去磁工作点，以增强其可靠性。对于超高矫顽力钕铁硼永磁材料，内禀矫顽力已可大于 2300kA/m，其退磁曲线在 150℃时仍为直线，如图 5.2-8（c）所示。

表 5.2-5 给出了国产烧结钕铁硼永磁材料的部分牌号及主要磁性能，供选用时参考。

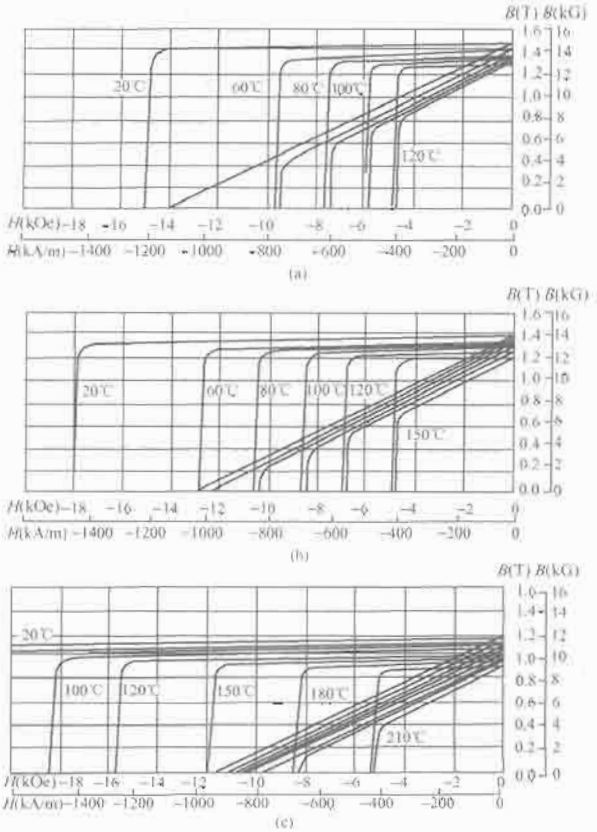


图 5.2-8　不同温度下钕铁硼永磁的内禀退磁曲线和退磁曲线
（a）NdFeB400/104M；（b）NdFeB360/98H；（c）NdFeB264/82EH

表 5.2-4　　稀土钴永磁材料部分牌号及其主要磁性能

牌　号	剩余磁感应强度 B_r		磁感应强度矫顽力 H_c		最大磁能积 $(BH)_{max}$		B_r 温度系数 α_{Br}（20～100℃）	回复磁导率 μ_r	密度（g/cm³）
	T	kGs①	kA/m	kOe①	kJ/m³	MG·Oe①	%/K		
XGS-80	0.60～0.70	6.0～7.0	320～384	4.0～4.8	72～78	9.0～9.5	－0.09	1.05～1.10	8.2～8.3
XGS-144	0.80～0.90	8.0～9.0	520～640	6.5～8.0	120～152	15～19	－0.05	1.05～1.10	8.2～8.3
XGS-160	0.90～1.00	9.0～10.0	640～720	8.0～9.0	152～176	19～22	－0.05	1.05～1.10	8.2～8.3
XGS-184	0.95～1.05	9.5～10.5	560～640	7.0～8.0	160～792	20～24	－0.03	1.05～1.10	8.1～8.3
XGS-200	1.00～1.10	10.0～11.0	640～720	8.0～9.0	192～208	24～26	－0.03	1.05～1.10	8.1～8.3

注　X 代表稀土，G 代表钴。
① 为非法定计量单位。

表 5.2-5　　烧结钕铁硼永磁材料的部分牌号及主要磁性能

种类	牌　号	剩余磁感应强度 B_r		磁感应强度矫顽力 H_c ≥		内禀矫顽力 H_{cJ} ≥		最大磁能积 $(BH)_{max}$	
		T	kGs①	kA/m	kOe①	kA/m	kOe①	kJ/m³	MG·Oe①
N	NdFeB280/88	1.16～1.22	11.6～12.2	876	11.0	955	12.0	263～287	33～36
	NdFeB304/88	1.22～1.27	12.2～12.7	876	11.0	955	12.0	287～310	36～39
	NdFeB320/88	1.25～1.31	12.5～13.1	876	11.0	955	12.0	302～326	38～41
	NdFeB336/88	1.28～1.34	12.8～13.4	876	11.0	955	12.0	318～342	40～43
	NdFeB360/88	1.32～1.38	13.2～13.8	876	11.0	955	12.0	342～366	43～46
	NdFeB384/84	1.37～1.43	13.7～14.3	836	10.5	915	11.5	366～390	46～49
	NdFeB400/84	1.40～1.46	14.0～14.6	836	10.5	915	11.5	382～406	48～51
	NdFeB416/84	1.43～1.49	14.3～14.9	836	10.5	915	11.5	398～422	50～53

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

种类	牌号	剩余磁感应强度 B_r		磁感应强度矫顽力 H_c ≥		内禀矫顽力 H_{cJ} ≥		最大磁能积 $(BH)_{max}$	
		T	kGs①	kA/m	kOe①	kA/m	kOe①	kJ/m³	MG·Oe①
M	NdFeB280/85	1.16～1.22	11.6～12.2	845	10.6	1114	14.0	263～287	33～36
	NdFeB320/91	1.25～1.31	12.5～13.1	912	11.5	1114	14.0	302～326	38～41
	NdFeB336/94	1.28～1.34	12.8～13.4	938	11.8	1114	14.0	318～342	40～43
	NdFeB360/98	1.32～1.38	13.2～13.8	976	12.2	1114	14.0	342～366	43～46
	NdFeB384/101	1.37～1.43	13.7～14.3	1012	12.7	1075	13.5	366～390	46～49
	NdFeB400/104	1.40～1.46	14.0～14.6	1035	13.0	1075	13.5	382～406	48～51
H	NdFeB264/82	1.12～1.19	11.2～11.9	816	10.2	1353	17.0	247～271	31～34
	NdFeB280/85	1.16～1.22	11.6～12.2	845	10.6	1353	17.0	263～287	33～36
	NdFeB304/89	1.21～1.27	12.1～12.7	886	11.1	1353	17.0	287～310	36～39
	NdFeB320/91	1.25～1.31	12.5～13.1	912	11.5	1353	17.0	302～326	38～41
	NdFeB336/94	1.28～1.34	12.8～13.4	938	11.8	1313	16.5	318～342	40～43
	NdFeB360/98	1.32～1.38	13.2～13.8	976	12.2	1274	16.0	342～366	43～46
	NdFeB376/100	1.36～1.41	13.6～14.1	1000	12.6	1274	16.0	358～382	45～48
SH	NdFeB240/77	1.07～1.14	10.7～11.4	772	9.7	1592	20.0	223～247	28～31
	NdFeB264/81	1.12～1.19	11.2～11.9	806	10.2	1592	20.0	247～271	31～34
	NdFeB280/85	1.16～1.22	11.6～12.2	845	10.6	1592	20.0	263～287	33～36
	NdFeB304/89	1.21～1.27	12.1～12.7	886	11.1	1592	20.0	287～310	36～39
	NdFeB320/91	1.25～1.31	12.5～13.1	912	11.5	1592	20.0	302～326	38～41
	NdFeB336/94	1.28～1.34	12.8～13.4	938	11.8	1592	20	318～342	40～43
UH	NdFeB240/77	1.07～1.14	10.7～11.4	772	9.7	1990	25	223～247	28～31
	NdFeB264/82	1.12～1.19	11.2～11.9	816	10.2	1990	25	247～271	31～34
	NdFeB280/85	1.16～1.22	11.6～12.2	845	10.6	1910	24	263～287	33～36
	NdFeB304/89	1.21～1.27	12.1～12.7	886	11.1	1910	24	287～310	36～39
EH	NdFeB240/77	1.07～1.14	10.7～11.4	772	9.7	2388	30	223～247	28～31
	NdFeB264/82	1.12～1.19	11.2～11.9	816	10.2	2388	30	247～271	31～34
	NdFeB280/85	1.16～1.22	11.6～12.2	845	10.6	2388	30	263～287	33～36

注 M代表 H_{cJ} ≥1114kA/m（14kOe），H代表 H_{cJ} ≥1353kA/m（17kOe），SH代表 H_{cJ} ≥1592kA/m（20kOe），UH代表 H_{cJ} ≥1990kA/m（25kOe），EH代表 H_{cJ} ≥2388kA/m（30kOe）。

① 为非法定计量单位。

1.2.4 黏结永磁材料

同通常的铸造或烧结永磁体相比，黏结永磁体因含有黏结剂而使磁性能稍低，但却具有如下的显著优点：

1）形状自由度大。容易制成形状复杂的磁体或薄壁环、薄片状磁体。注射成形时还能嵌入其他零件一起成形。

2）尺寸精度高，不变形。烧结永磁体的收缩率为13%～17%，而黏结永磁体的收缩率只有0.2%～0.5%。不需要二次加工就能制成高精度的磁体。

3）产品性能分散性小。合格率高，适合于大批量生产。

4）机械强度高。不易破碎，可进行切削加工。

5）电阻率高，易于实现多极充磁。

6）原材料利用率高。浇口、边角料、废品等进行退磁处理、粉碎后能简单地再生使用。

7）密度小，质量轻。采用黏结永磁体，可以简化电机制造工艺，并且能获得良好的电机性能，特别是对于一次成形的多极转子或多极定子，采用黏结永磁体有它得天独厚的优点，深受用户欢迎。

下面简要介绍几种黏结永磁材料：

1）黏结铁氧体永磁材料主要是黏结锶和钡铁氧体，各向同性产品可做到4.0～5.5kJ/m³，B_r 为0.15～0.17T，H_c 为110～135kA/m，而各向异性黏结铁氧体可做到15.0～16.5kJ/m³，B_r 为0.28～0.30T，H_c 为180～210kA/m，主要用于微电机中。

2）黏结稀土钴永磁材料的制备工艺比黏结铁氧体永磁复杂，制备磁粉的热处理必须在真空中或氩气保护下进行。这样处理后，可使 H_c 明显提高。目前黏结1：5型稀土钴永磁材料 $(BH)_{max}$ 可做到80～95kJ/m³，B_r 为0.7T，H_c 为320kA/m。黏结2：17型稀土钴永磁材料的 $(BH)_{max}$ 可达160kJ/m³，B_r 为0.73～0.88T，H_c 为477.6～541.3kA/m。黏结稀土钴永磁材料主要用于家用电器、石英钟表、计量器、微特电机中。

3）黏结钕铁硼永磁材料是近年来发展起来的新产品。目前生产这种永磁材料的磁粉有两种工艺：一是快淬工艺；二是氢化—歧化—脱氢—再组合法，简称HDDR法。应用这两种方法制备的钕铁硼磁粉采用专门设备及工艺再制成黏结钕铁硼磁体。磁体性能还与磁体成形方法和所含磁粉填充率有关，模压成形的磁体密度为6～6.3g/cm³，磁性能是磁粉磁性能的60%～70%，而注射成形磁体的密度仅为5～5.3g/cm³，其磁性能只有模压成形磁体的60%～70%。按照制造工艺和性能的不同，习惯上将黏结钕铁硼永磁材料分为三型。Ⅰ型为压模成形的环氧树脂黏结各向同性磁体；Ⅱ型为热压的各向同性磁体；Ⅲ型为热变形的各向异性磁体，最大磁能积已接近320kJ/m³。

表5.2-6给出了国产黏结永磁体的部分牌号及主要磁性能，供选用时参考。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 5.2-6 黏结永磁材料的部分牌号及主要磁性能

牌号	剩余磁感应强度 B_r		磁感应强度矫顽力 H_{cB}		最大磁能积 $(BH)_{max}$		内禀矫顽力		B_r 温度系数 α_{Br}	抗压强度	密度
	T	kGs①	kA/m	kOe①	kJ/m³	MG·Oe①	kA/m	kOe①	%/K	N·mm²	g/cm³
GBM-5	0.45~0.50	4.5~5	200~280	2.5~3.5	24~40	3~5	≥640	≥8.0	−0.11	150~250	5.7~6.0
GBM-6	0.50~0.55	5~5.5	280~320	3.5~4.0	40~48	5~6	≥640	≥8.0	−0.11	150~250	5.7~6.0
GBM-7	0.55~0.60	5.5~6	320~360	4.0~4.5	48~56	6~7	≥640	≥8.0	−0.11	150~250	5.7~6.0
GBM-8	0.60~0.63	6~6.3	360~400	4.5~5.0	56~64	7~8	≥640	≥8.0	−0.11	150~250	5.7~6.0
GBM-9	0.63~0.65	6.3~6.5	400~432	5.0~5.4	64~72	8~9	≥640	≥8.0	−0.11	150~250	5.7~6.2
GBM-10	0.65~0.70	6.5~7	432~480	5.4~6.0	72~80	9~10	≥640	≥8.0	−0.11	150~250	5.7~6.2
GBM-11	0.70~0.80	7.0~8	480~520	6.0~6.5	80~96	10~12	≥640	≥8.0	−0.11	150~250	5.7~6.2
GBM-s	0.45~0.50	4.5~5	280~360	3.5~4.5	24~40	4~5	≥1200	≥15	−0.04	150~250	6.5~7.0
GBM-L-1	0.70~0.75	7~7.5	160~200	2.0~2.5	32~48	5~6	240~280	3.0~3.5	−0.12	150~250	5.7~6.0
GBM-L-2	0.75~0.80	7.5~8	160~200	2.0~2.5	48~56	6~7	240~280	3.0~3.5	−0.12	150~250	5.7~6.0
GBM-F-1	0.30~0.60	3.0~6	136~160	1.7~2.0	12~32	1.5~4.0	200~280	2.5~3.5	−0.13	180~250	4.2~5.2
GBM-F-2	0.25~0.30	2.5~3	80~160	1.0~2.1	8~12	1.0~1.5	120~240	1.5~3.0	−0.13	180~250	4.0~4.5
GBM-F-3	0.15~0.25	1.5~2.5	72~120	0.9~1.5	4~8	0.5~1.0	144~224	1.8~2.8	−0.20	180~250	3.5~4.5

注 GBM 为黏结钕铁硼；GBM-s 是黏结 SmCo 磁体；GBM-L-1、2 系列牌号是低钕双相耦合型黏结磁体；GBM-F-1、2、3 系列牌号是复合型黏结磁体。

① 为非法定计量单位。

1.3 永磁材料的选用

1.3.1 永磁材料的选择

永磁材料的种类多种多样，性能相差很大，因此在设计永磁电机时，首先要选择好适宜的永磁材料品种和具体的性能指标。归纳起来，选择原则为：

1）应能保证电机气隙中有足够大的气隙磁通密度和规定的电机性能指标。

2）在规定的环境条件、工作温度和使用条件下应能保证磁性能的稳定性。

3）有良好的力学性能，以方便加工和装配。

4）经济性要好，价格适宜。

根据现有永磁材料的性能和电机的性能要求，有以下几点说明：

1）随着性能的不断完善和相对价格的逐步降低，钕铁硼永磁材料在电机中的应用将越来越广泛。不仅在部分场合有可能取代其他永磁材料，还可能逐步取代传统的部分电励磁电机。

2）对于性能和可靠性要求很高而价格不是主要因素的场合，优先选用高矫顽力的 2：17 型稀土钴永磁材料。1：5 型稀土钴永磁材料的应用场合将有所缩小，主要用于在高温情况下使用和退磁磁场大的场合。

3）对于性能要求一般，体积质量限制不严，价格是考虑的主要因素，优先采用价格低廉的铁氧体永磁材料。

4）在工作温度超过 300℃ 的场合或对温度稳定性要求严格的场合，如各种测量仪器用电机，优先采用温度系数低的铝镍钴永磁材料。铝镍钴永磁材料在永磁材料总量中的比例将逐步下降。

5）在生产批量大且磁极形状复杂的场合，优先采用黏结永磁材料。

具体选用时，应进行多种方案的性能、工艺、成本的全面分析比较后确定。

1.3.2 应用注意事项

在应用时除前面提到的以外，还应注意：

1）本章提供的各种永磁材料磁性能，摘自国家标准或工厂企业标准的典型数据。但永磁材料的实际磁性能与生产厂的具体制造工艺有关，其值与标准之间存在着偏差。而且标准中或产品样本中规定的性能数据是以特定形状和尺寸的试样（例如钕铁硼永磁材料的标准试样为 ϕ10mm×7mm 的圆柱）测试性能为依据的，对于电机中实际采用的永磁体形状和尺寸，其磁性能与标准值之间也会存在一定的差别。因此为提高电机设计计算的准确性，需要向生产厂家索取该批号的实际尺寸的永磁体在室温和最高工作温度时的实际退磁曲线，最好能抽样直接测量退磁曲线。对于一致性要求高的电机，更需对永磁体进行逐一检测。

2）永磁材料的磁性能除与合金成分和制造工艺有关外，还与磁场热处理工艺有关。对于各向异性的永磁体，充磁时的磁场方向应与磁场热处理时的磁场方向一致，否则磁性能反而会有所降低。

3）在使用前，应先进行最高工作温度的稳磁处理（或叫老化处理），以预先消除不可逆损失。铁氧体永磁材料则不同，由于它的矫顽力温度系数为正值，温度越低、矫顽力越小，故需进行负温稳磁处理。需要指出的是，经过高温或负温稳磁处理后，不能再对永磁体充磁；如有必要再次充磁，则需重新进行高温和负温稳磁处理。

2 永磁电机的等效磁路

2.1 永磁体等效为磁通源或磁动势源

当永磁材料的退磁曲线为直线［见图 5.2-9（a），改用 $\Phi=BA$ 和 $F=Hh$ 表示时，见图 5.2-9（b）］时，可以将永磁体等效为磁通源或磁动势源两种等效磁源。

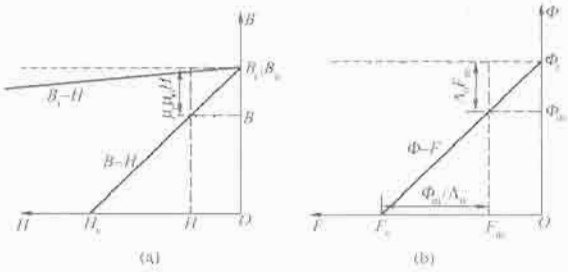


图 5.2-9 永磁材料的内禀曲线和退磁曲线
（a）$B=f(H)$ 曲线；（b）$\Phi=f(F)$ 曲线

2.1.1 永磁体等效为磁通源

永磁体可以等效为一个恒磁通源 Φ_r 与一个恒定的内磁导 Λ_0 相并联的磁通源，如图 5.2-10 所示。图中，Φ_r 为永磁体虚拟内禀磁通（Wb），对应于图 5.2-9（b）中虚线 1′。对于给定的永磁体性能和尺寸，它是一个常数，即

$$\Phi_r = B_{rr} A_m \tag{5.2-12}$$

式中，B_{rr} 为永磁体内禀剩余磁感应强度，T，通常 $B_{rr}=B_r$；A_m 为永磁体提供每极磁通的截面积，m^2。

图 5.2-10 中，Φ_σ 为永磁体的虚拟内漏磁通，Wb，或

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

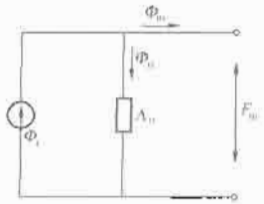


图 5.2-10 永磁体等效为磁通源

叫虚拟自退磁磁通，即

$$\Phi_0 = \mu_r\mu_0 HA_m = \frac{\mu_r\mu_0 A_m}{h_{Mp}} \times Hh_{Mp} = \Lambda_0 F_m \tag{5.2-13}$$

式中，h_{Mp} 为每对极磁路中永磁体磁化方向长度，m；Λ_0 为永磁体的内磁导，H，对于给定的永磁体性能和尺寸，它是一个常数，即

$$\Lambda_0 = \frac{\mu_r\mu_0 A_m}{h_{Mp}} \tag{5.2-14}$$

F_m 为每对极磁路中永磁体两端向外磁路提供的磁动势，A，即

$$F_m = Hh_{Mp} \tag{5.2-15}$$

Φ_m 为永磁体向外磁路提供的每极总磁通，Wb，即

$$\Phi_m = BA_m = \Phi_r - \Phi_0 \tag{5.2-16}$$

2.1.2 永磁体等效为磁动势源

正如电路中电压源和电流源可以等效互换一样，永磁体也可以等效为一个恒磁动势源 F_c 与一个恒定的内磁导 Λ_0 相串联的磁动势源，如图 5.2-11 所示。图中，F_c 为永磁体磁动势源的计算磁动势，A，对于给定的永磁体性能和尺寸，它是一个常数，即

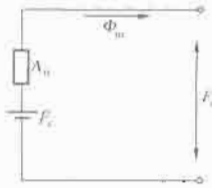


图 5.2-11 永磁体等效为磁动势源

$$F_c = H_c h_{Mp} \tag{5.2-17}$$

式中，H_c 为永磁体的磁感应强度矫顽力，A/m。

而

$$F_m = F_c - \frac{\Phi_m}{\Lambda_0}$$

2.2 外磁路的等效磁路

永磁体向外磁路所提供的总磁通 Φ_m 可分为两部分：一部分与电枢绕组匝链，称为主磁通（即每极气隙磁通）Φ_δ；另一部分不与电枢绕组匝链，称为漏磁通 Φ_σ。相应地将永磁体以外的磁路（简称外磁路）分为主磁路和漏磁路，相应的磁导分别为主磁导 Λ_δ 和漏磁导 Λ_σ。在空载情况下，外磁路的等效磁路如图 5.2-12 所示。

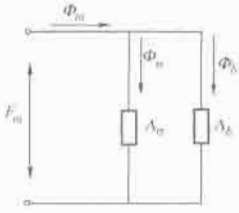


图 5.2-12 空载时外磁路的等效磁路

在负载运行时，其相应的等效磁路如图 5.2-13（a）所示。根据对励磁磁场作用的不同，F_a 起增磁或去磁作用。本卷约定，起去磁作用时，F_a 为正值；起增磁作用时，F_a 为负值。

为便于分析计算，可以应用电工理论中的戴维南定理，将图 5.2-13（a）的等效磁路变换成图 5.2-13（b），其中

$$\left.\begin{aligned} \Lambda' &= \Lambda_n = \Lambda_\delta + \Lambda_\sigma = \frac{\Lambda_\delta + \Lambda_\sigma}{\Lambda_\delta}\Lambda_\delta = \sigma\Lambda_\delta \\ F_a' &= F_a \frac{\dfrac{1}{\Lambda_\sigma}}{\dfrac{1}{\Lambda_\sigma} + \dfrac{1}{\Lambda_\delta}} = F_a \frac{\Lambda_\delta}{\Lambda_\delta + \Lambda_\sigma} = \frac{F_a}{\sigma} \end{aligned}\right\} \tag{5.2-18}$$

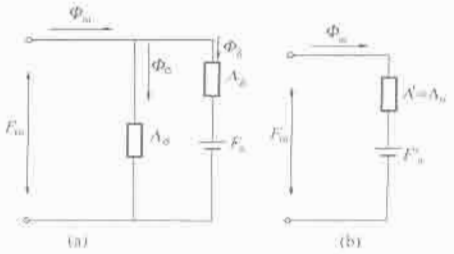


图 5.2-13 负载时外磁路的等效磁路

式中，Λ_n 为外磁路的合成磁导，H；σ 为变换因数，即

$$\sigma = \frac{\Lambda_\delta + \Lambda_\sigma}{\Lambda_\delta} \tag{5.2-19}$$

2.3 永磁电机的等效磁路

将图 5.2-13 与图 5.2-10 或图 5.2-11 合并，得负载时永磁电机总的等效磁路，如图 5.2-14 所示。令 $F_a = 0$，即得空载时的等效磁路。对于不同的永磁电机，等效磁路的具体构成将有所区别。

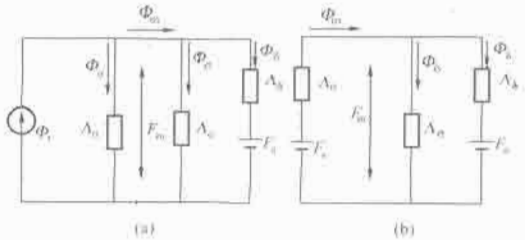


图 5.2-14 负载时永磁电机的等效磁路
（a）磁通源等效磁路；（b）磁动势源等效磁路

2.4 主磁导和漏磁导

永磁电机的主磁路通常包括气隙、定（转）子齿、轭等几部分。可以用通常的磁路计算法求取在每极气隙磁通即主磁通 Φ_δ（Wb）情况下每对极各段磁路磁位差的总和 $\sum F$（A），得出 $\Phi_\delta = f(\sum F)$ 曲线。则在某一 Φ_δ 时主磁路的主磁导 Λ_δ（H）为

$$\Lambda_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\sum F} \tag{5.2-20}$$

由于主磁路中有铁磁材料，其磁位差通常不能忽略，因此，主磁导 Λ_δ 不是常数，随主磁路的饱和程度不同而变化。为便于分析 Λ_δ 与磁位差中主要部分——气隙的参数和磁路饱和程度的关系，Λ_δ 可表示为

$$\Lambda_\delta = \frac{\mu_0 A_\delta}{2\delta K_\delta K_s} = \frac{\mu_0 \alpha_i \tau l_{ef}}{2\delta K_\delta K_s} \tag{5.2-21}$$

式中，A_δ 为每极气隙有效面积，m^2；α_i 为计算极弧因数；τ 为极距，m；l_{ef} 为电枢计算长度，m；δ 为气隙长度，m；K_δ 为气隙因数；K_s 为磁路饱和因数。

漏磁导 Λ_σ 的计算较为繁杂，并且也很难计算得十分准确。有的电机漏磁路路径的大部分是空气，铁心部分的影响通常可以忽略不计，则 $\Phi_\sigma = f(F_\sigma)$ 基本上是一条直线，即 Λ_σ 基本上是个常数。有的电机，例如永磁同步电动机的内置径向式磁路结构，漏磁路中有一段高度饱和的铁心，$\Phi_\sigma = f(F_\sigma)$ 是一条曲线，即 Λ_σ 不是常数。通常需要通过电磁场计算来求取。

2.5 漏磁因数和空载漏磁因数

永磁体向外磁路提供的总磁通 Φ_m 与外磁路的主磁通 Φ_δ 之比被称为漏磁因数 σ_1。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$\sigma_{\mathrm{f}}=\frac{\Phi_{\mathrm{m}}}{\Phi_{\delta}}=\frac{\Phi_{\delta}+\Phi_{\sigma}}{\Phi_{\delta}}=1+\frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi_{\delta}} \tag{5.2-22}$$

在电机永磁材料的形状和尺寸、气隙、外磁路尺寸一定的情况下，σ_{f} 还随负载情况不同，即主磁路和漏磁路的饱和程度不同而变化，不是常数。

空载时，$F_{\mathrm{a}}=0$。空载总磁通与空载主磁通之比在数值上等于外磁路的合成磁导与主磁导之比。因此，空载时的漏磁因数 σ_0 还可以用磁导表示为

$$\sigma_0=\frac{\Lambda_\delta+\Lambda_\sigma}{\Lambda_\delta}=1+\frac{\Lambda_\sigma}{\Lambda_\delta} \tag{5.2-23}$$

式（5.2-19）表示的是负载时外磁路的等效变换因数 σ，其表达式正好等于空载漏磁因数 σ_0 以磁导表示的表达式（5.2-23）。需要注意的是，漏磁因数 σ_0 表示的是空载时的合成磁导与主磁导之比，而变换因数 σ 表示的是负载时的合成磁导与主磁导之比。由于空载时与负载时的磁路饱和程度不同，通常情况下，σ 和 σ_0 的表达式虽然相同，但其值并不相等。计算变换因数 σ 时需要采用与负载时磁路饱和程度相对应的合成磁导与主磁导之比。只有在某些可以忽略磁路饱和影响的永磁电机中，σ 和 σ_0 才在数值上相等或近似相等。

由式（5.2-18）和式（5.2-23）可以看出，空载漏磁因数 σ_0 是一个很重要的参数。一方面，σ_0 大，表明漏磁导 Λ_σ 相对较大，$\Lambda_\sigma=(\sigma_0-1)\Lambda_\delta$，在永磁体提供总磁通一定时，漏磁通较大而主磁通较小，永磁体的利用率就差。另一方面，σ_0 大，表明 σ 也大，对电枢反应的分流作用大，电枢反应对永磁体两端的实际作用值 F'_{a} 就小，永磁体的抗去磁能力就强。因此设计时要综合考虑，选取合适的 σ_0 值。

3　等效磁路的解析法

采用标么值可使永磁电机磁路计算和分析得到进一步简化，下面以图 5.2-14 所示等效磁路阐述其求解过程。

3.1　等效磁路各参数的标么值

标么值是各物理量的实在值与其基值（两者单位相同）的比值。永磁磁路中有关物理量的基值选为

磁通基值

$$\Phi_{\mathrm{b}}=\Phi_{\mathrm{r}}=B_{\mathrm{r}}A_{\mathrm{m}} \tag{5.2-24}$$

磁动势基值

$$F_{\mathrm{b}}=F_{\mathrm{c}}=H_{\mathrm{c}}h_{\mathrm{M}\psi} \tag{5.2-25}$$

磁导基值

$$\Lambda_{\mathrm{b}}=\frac{\Phi_{\mathrm{b}}}{F_{\mathrm{b}}}=\Lambda_0 \tag{5.2-26}$$

通常用小写字母表示各相应物理量的标么值，即

$$\phi_{\mathrm{m}}=\frac{\Phi_{\mathrm{m}}}{\Phi_{\mathrm{r}}}=\frac{B_{\mathrm{m}}}{B_{\mathrm{r}}}=b_{\mathrm{m}} \tag{5.2-27}$$

$$\phi_{\mathrm{t}}=\frac{\Phi_{\mathrm{t}}}{\Phi_{\mathrm{t}}}=1=b_{\mathrm{t}} \tag{5.2-28}$$

$$f_{\mathrm{m}}=\frac{F_{\mathrm{m}}}{F_{\mathrm{c}}}=\frac{H_{\mathrm{m}}}{H_{\mathrm{c}}}=h_{\mathrm{m}} \tag{5.2-29}$$

$$f'_{\mathrm{a}}=\frac{F'_{\mathrm{a}}}{F_{\mathrm{c}}}=h'_{\mathrm{a}} \tag{5.2-30}$$

$$f_{\mathrm{c}}=\frac{F_{\mathrm{c}}}{F_{\mathrm{c}}}=1=h_{\mathrm{c}} \tag{5.2-31}$$

$$\lambda_\delta=\frac{\Lambda_\delta}{\Lambda_{\mathrm{b}}} \tag{5.2-32}$$

$$\lambda_0=\frac{\Lambda_0}{\Lambda_{\mathrm{b}}}=1 \tag{5.2-33}$$

$$\lambda_\sigma=\frac{\Lambda_\sigma}{\Lambda_{\mathrm{b}}} \tag{5.2-34}$$

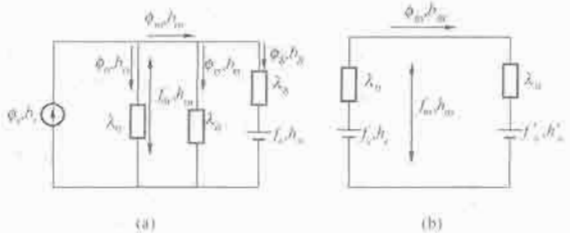
用标么值表示时，所有直线的回复线（或退磁曲线）都可用解析式表示为

$$\phi_{\mathrm{m}}=1-f_{\mathrm{m}} \tag{5.2-35}$$

或

$$b_{\mathrm{m}}=1-h_{\mathrm{m}}$$

其相应的以标么值表示的等效磁路如图 5.2-15 所示。



(a)　(b)

图 5.2-15　以标么值表示的等效磁路

（a）磁通源等效磁路；（b）磁动势源等效磁路

3.2　等效磁路的解析法

先分析磁路不饱和，即 λ_δ、λ_σ 和 λ_{n} 都是常数的情况。此时可以直接用解析法对等效磁路图 5.2-15（b）求解。

电机空载时，求解得

$$\left.\begin{aligned}\phi_{\mathrm{m}0}&=\frac{\lambda_0}{\lambda_{\mathrm{n}}+1}=b_{\mathrm{m}0}\\ f_{\mathrm{m}0}&=\frac{1}{\lambda_{\mathrm{n}}+1}=h_{\mathrm{m}0}\end{aligned}\right\} \tag{5.2-36}$$

由此可求出空载时各部分磁通（Wb）为：

永磁体提供的总磁通

$$\Phi_{\mathrm{m}0}=b_{\mathrm{m}0}B_{\mathrm{r}}A_{\mathrm{m}}$$

漏磁通

$$\Phi_{\sigma 0}=h_{\mathrm{m}0}\lambda_\sigma B_{\mathrm{r}}A_{\mathrm{m}}$$

每极气隙磁通

$$\Phi_{\delta 0}=(b_{\mathrm{m}0}-h_{\mathrm{m}0}\lambda_\sigma)B_{\mathrm{r}}A_{\mathrm{m}}=\frac{b_{\mathrm{m}0}B_{\mathrm{r}}A_{\mathrm{m}}}{\sigma_0} \tag{5.2-37}$$

负载时，求解得

$$\left.\begin{aligned}\phi_{\mathrm{m}N}&=\frac{\lambda_{\mathrm{n}}(1-f'_{\mathrm{a}})}{\lambda_{\mathrm{n}}+1}=b_{\mathrm{m}N}\\ f_{\mathrm{m}N}&=\frac{1+\lambda_{\mathrm{n}}f'_{\mathrm{a}}}{\lambda_{\mathrm{n}}+1}=h_{\mathrm{m}N}\end{aligned}\right\} \tag{5.2-38}$$

由此可以计算出负载时各部分磁通（Wb）为

永磁体提供的总磁通

$$\Phi_{\mathrm{m}N}=b_{\mathrm{m}N}B_{\mathrm{r}}A_{\mathrm{m}}$$

漏磁通

$$\Phi_{\sigma N}=h_{\mathrm{m}N}\lambda_\sigma B_{\mathrm{r}}A_{\mathrm{m}}$$

每极气隙磁通

$$\Phi_{\delta N}=(b_{\mathrm{m}N}-h_{\mathrm{m}N}\lambda_\sigma)B_{\mathrm{r}}A_{\mathrm{m}} \tag{5.2-39}$$

然后用通常的磁路计算方法，根据外磁路尺寸和材质的磁化特性，求出磁路各部分的磁通密度和磁位差，并用以检查永磁电机设计的合理性和调整磁路设计。

通常情况下，永磁电机的磁路是饱和的，λ_{n} 不是常数。此时可采取下列方法进行处理：

1）当磁路的饱和程度不高时，λ_{n} 的变化范围不大。此时可进行近似线性化处理，即计算出额定工况时的 λ_{n}，近似认为它是一个常数，以此代入上面各式进行计算。

2）当磁路比较饱和时，空载、额定工况和最大去磁时的 λ_{n} 随饱和程度不同而变化较大，而且 ϕ_{m} 和 λ_{n} 又互相制约。此时需利用迭代方法求解，图 5.2-16 示出计算 $b_{\mathrm{m}0}$ 的流程框图。

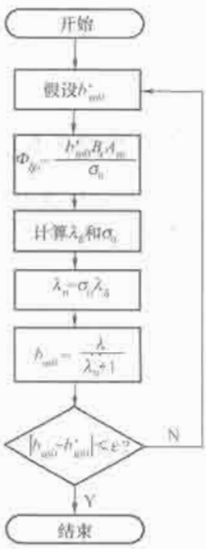


图 5.2-16　计算 $b_{\mathrm{m}0}$ 流程框图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

3.3 解析法的应用

上节结果可以推广应用于所有永磁材料：

1）对于铁氧体永磁材料和部分高温下工作的钕铁硼永磁材料，退磁曲线的上半部分为直线，回复线与拐点以上的直线段退磁曲线相重合，如图5.2-17所示。此时，只要在设计中采取措施保证永磁体的最低工作点不低于拐点，并且改用回复线的延长线与横轴的交点 H'_c（称为计算矫顽力）替代式(5.2-17)的 H_c，则前面的分析方法和结论仍然适用。

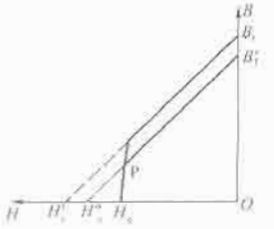


图5.2-17 具有拐点的直线型退磁曲线和回复线

2）对于铝镍钴类永磁，退磁曲线为曲线，但经过工作性稳磁处理后，起始点以上的回复线也是直线，仅是回复线的高低与起始点P的位置有关，如图5.2-18所示。此时，需要先进行工作性稳磁处理计算，并且使稳磁的起始点P低于永磁体的最低工作点，然后改用此时的回复线与纵轴的交点 B'_r（称为计算剩磁密度）替代式（5.2-12）的 B_{rP}，用回复线的延长线与横轴的交点 H'_c 替代式（5.2-17）的 H_c，并作为计算的基值，就可以同样应用前面的分析方法与结论。

对于有拐点的直线型退磁曲线，如果永磁体的最低工作点低于拐点，则应以最低工作点为起始点P，采用新的回复线的 B'_r 和 H'_c 替代式（5.2-12）的 B_{rP} 和式（5.2-17）的 H_c，用同样的方法进行处理，如图5.2-17所示。

必须着重指出，永磁材料的磁性能对温度的敏感性很大，尤其是钕铁硼永磁和铁氧体永磁，其 B_r 的温度系数达 −0.126%/K 和 −（0.18～0.20）%/K。因此实际应用时，不能直接引用材料生产厂提供的数值，而要根据实测退磁曲线换算到工作温度时的计算剩磁密度 B_r 和计算矫顽力 H_c，以此作为基值进行计算。温度不同，B_r 和 H_c 随着改变，计算的工作点和磁通也不相同。

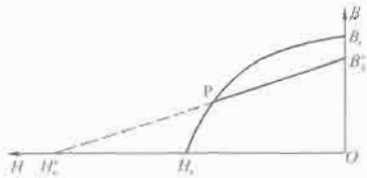


图5.2-18 曲线型退磁曲线和回复线

4 等效磁路的图解法

工程上，在应用解析法进行计算机求解的同时，还常采用图解法直接画出永磁体工作图进行补充分析。

图解法求解等效磁路就是求出回复线与合成磁导线的交点，如图5.2-19所示。作图时先在 $\Phi-F$ 坐标中画出永磁体的回复线及其延长线 Φ_r、F'_c。再根据外磁路的结构型式、尺寸及磁路饱和程度，画出主磁导线 $\Lambda_\delta = f(\Phi_m)$，即主磁路的磁化特性曲线 $\Phi_\delta = f(\sum F)$，并根据漏磁通情况，画出漏磁导线 $\Lambda_\sigma = f(\Phi_m)$，即漏磁路的磁化特性曲线 $\Phi_\sigma = f(\sum F)$；或者由 $\Lambda_\sigma = (\sigma_0 - 1)\Lambda_\delta$ 求出漏磁导线。然后将两条磁导线沿纵轴方向相加，得合成磁导线 $\Lambda_n = f(\Phi_m)$，即外磁路合成磁化特性曲线 $\Phi_m = f(\sum F)$。它与回复线的交点 a 即为空载时永磁体的工作点，其纵坐标表示永磁体所提供的空载磁通 Φ_{m0}，横坐标表示永磁体所提供的磁动势 F_{m0}。a点的垂线与 Λ_δ 和 Λ_σ 线的交点分别表示空载主磁通 $\Phi_{\delta 0}$ 和空载漏磁通 $\Phi_{\sigma 0}$。

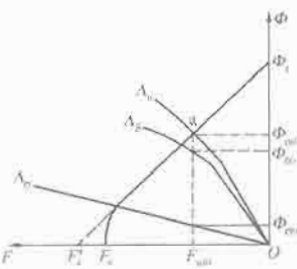


图5.2-19 空载时等效磁路图解法

为简捷起见，在不致发生混淆的情况下，以后用 B_r 和 H_c 来代替 B'_r 和 H'_c。

负载时，在外磁路中存在有电枢磁动势 F_a 或等效磁动势 $F'_a = F_a/\sigma$，由图5.2-13（b）可知，此时作用于外磁路合成磁导 Λ_n 的磁动势为 $F_m - F'_a$。因此，只要将合成磁导线从原点向左平移 $|F'_a|$ 距离，合成磁导线与回复线的交点N即为负载时永磁体工作点，其垂线与合成磁导线和漏磁导线的交点分别表示负载时的总磁通 Φ_{mN} 和漏磁通 $\Phi_{\sigma N}$，两者之差即为气隙磁通 $\Phi_{\delta N}$，如图5.2-20所示。如 F_a 起增磁作用，作用于外磁路磁导 Λ_n 的磁动势为 $F_m + F'_a$，则将合成磁导线从原点向右移动 $|F'_a|$ 的距离即可。

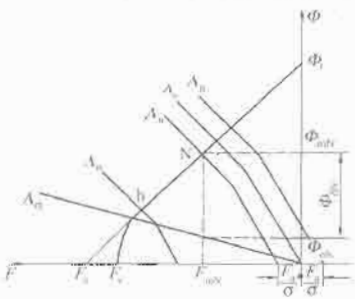


图5.2-20 负载时等效磁路图解法

当永磁材料的退磁曲线有拐点时，要进行去磁校核计算，即计算电机运行时可能出现的最大去磁电流，用以求出该时的工作点h，如h点低于退磁曲线的拐点，则将产生不可逆退磁。此时，或者调整磁路设计，使h点高于拐点，或者据此重新确定回复线起始点和新的回复线，重新求解。

在设计计算中通常采用 $B-H$ 坐标，即将图5.2-20的纵坐标除以 A_m，横坐标除以 h_{Mp}，得到图5.2-21。相应地将磁导 Λ 乘以 h_{Mp}/A_m 得到其相对值，称为比磁导 P。

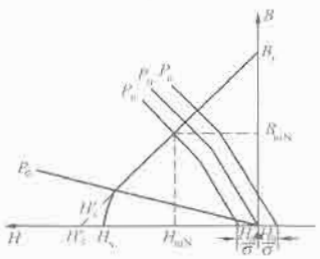


图5.2-21 $B-H$ 坐标的永磁体工作图

进一步采用标么值表示，如图5.2-22所示。此时不仅 $\phi = f(F)$ 和 $b = f(h)$ 相同，所有永磁材料的回复线及其延长线可以用同一条线表示（但拐点位置不同），而且 λ_n、λ_δ 和 λ_σ 的变化范围都不大，计算和分析比较时都更为方便。

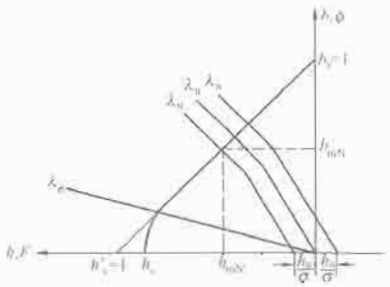


图5.2-22 以标么值表示的永磁体工作图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

5　永磁体的最佳工作点

在设计永磁电机时，为了充分利用永磁材料，应该力求用最小的永磁体体积在气隙中建立具有最大磁能的磁场，也就是永磁体工作点应设计在最佳工作点附近。

5.1　最大磁能的永磁体最佳工作点

具有最大磁能的永磁体最佳工作点的标么值为

$$b_D = \varphi_D = 0.5 \tag{5.2-40}$$

5.2　最大有效磁能的永磁体最佳工作点

在永磁电机中存在漏磁通，实际参与机电能量转换的是气隙磁场中的有效磁能，并不是永磁体的总磁能。因此永磁体的最佳工作点应该选在有效磁能最大的点。具有最大有效磁能的永磁体最佳工作点的标么值为

$$b_e = \varphi_e = \frac{\sigma_1}{2} \tag{5.2-41}$$

需要指出，式（5.2-41）中的 σ_1 是负载漏磁因数，并不是空载漏磁因数 σ_0。在开始设计时，σ_1 尚是未知数，且其值与 b_e 值有关。

为分析方便，永磁体最佳工作点还可用 λ_a 表示，得

$$b_e = \varphi_e = \frac{2\lambda_a + 1}{2\lambda_a + 2} \tag{5.2-42}$$

5.3　永磁体最佳工作点的应用及注意事项

由永磁体最佳工作点出发，可以大致估算电机中永磁体最佳利用时外磁路尺寸和永磁体之间的关系。由式（5.2-38）和式（5.2-41）经整理得 λ_n 的最佳值为

$$\lambda_n = \frac{\sigma_1}{2 - \sigma_1 - 2f_a} \tag{5.2-43}$$

由式（5.2-18）、式（5.2-21）和式（5.2-26）得

$$\lambda_n = \sigma_0 \lambda_a = \frac{\sigma_0 \alpha_i \tau L_{ef}}{2\delta K_\delta K_s \mu_r} \frac{h_{Mp}}{A_m} \tag{5.2-44}$$

由上两式可以看出，为了求得永磁体的最佳利用，必须正确选择永磁体尺寸、外磁路的结构和尺寸以及两者之间的配合关系。

以上分析的是理想情况，在实际应用时要受到其他因素的制约，有时就不得不偏离最佳工作点，例如：

1）当退磁曲线具有拐点时，首先要进行最大去磁工作点（b_{mh}、h_{mh}）的校核，使其高于退磁曲线（或回复线）的拐点（b_k、h_k），即 $b_{mh} \geqslant b_k$ 或 $h_{mh} \leqslant h_k$，并留有充分余地，以防止永磁体产生不可逆退磁。在保证不失磁的前提下，追求尽可能大（通常不是最大）的有效磁能。

2）永磁体的最佳利用不一定导致电机的最佳设计，因为影响电机设计的因素除永磁体尺寸外，还要考虑结构、工艺和某些性能的特殊要求。因此，在设计电机时，首先着眼于最佳电机设计，有时只好放弃永磁体的最佳利用。一般取 $b_{mN} = 0.60 \sim 0.85$，这需要根据对电机的具体要求，经过方案比较后确定。

6　永磁电机电磁场数值分析

6.1　永磁电机电磁场数值计算的特点

6.1.1　边值问题和条件变分问题

电机电磁场一般不考虑位移电流的影响，属于似稳场。电机中分析得最多的是垂直于电机轴的平行平面场，这时电流密度和磁矢位只有 z 轴方向的分量。对于稳态情况，平面场域 Ω 上的电磁场问题可表示边值问题为

$$\left.\begin{aligned} \Omega:& \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu \frac{\partial A}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu \frac{\partial A}{\partial y}\right) = -J_z \\ \Gamma_1:& A = A_0 \\ \Gamma_2:& \nu \frac{\partial A}{\partial n} = -H_t \end{aligned}\right\} \tag{5.2-45}$$

式中，ν 为磁阻率，$\nu = 1/\mu$，μ 为磁导率；A 为磁矢位，因为 A 只有 z 轴分量，故可写成标量形式；J_z 为源电流密度；H_t 为磁场强度的切向分量；Γ_1 为第一类边界；Γ_2 为第二类边界。

式（5.2-45）等价为以下条件变分问题

$$\left.\begin{aligned} W(A) =& \iint_\Omega \left(\int_0^B \nu B \mathrm{d}B - J_z A\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y - \int_{\Gamma_2} (-H_t) A \mathrm{d}l = \min \\ \Gamma_1:& A = A_0 \end{aligned}\right\} \tag{5.2-46}$$

式中，$B = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2}$。

6.1.2　边界条件的确定

由于铁磁物质的磁导率远远大于空气磁导率，一般可取电机外侧表面作为边界面，这条边界属于第一类齐次边界，这种近似在工程上是合理的。很多情况下，电机轴的外表面也被取为第一类齐次边界。以永磁同步电机为例，其求解区域如图 5.2-23 所示，边界条件为

$$A\,|_{\mathrm{BFD}} = A\,|_{\mathrm{ABC}} = 0$$

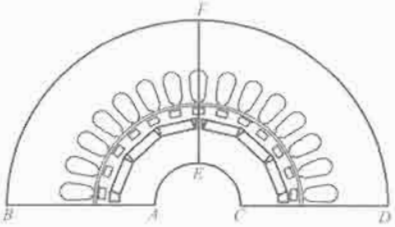


图 5.2-23　永磁同步电机求解区域

由于电机结构的对称性，旋转电机磁场沿周向是周期变化的，具有周期性条件，这使计算时可以只计算电磁场的一部分。一般地，可以取电机的一个极距范围作求解区域，此时在两条径向线上满足半周期边界条件，即

$$A\,|_{\mathrm{AB}} = -A\,|_{\mathrm{CD}}$$

当然，如果只分析电机的空载磁场时，可以取半个极距为求解区，此时在磁极中心线 EF 上满足第一类齐次边界条件，即

$$A\,|_{\mathrm{EF}} = 0$$

而在电机的相邻两极之间的中性线上，磁力线都是垂直穿过，磁位沿极间几何中性线法线方向的变化率为零，即满足第二类齐次边界条件，即

$$\left.\frac{\partial A}{\partial n}\right|_{\mathrm{AB}} = 0$$

6.1.3　电磁场中磁矢位的应用

磁矢位不仅是一个过渡函数，而且还有其他实用意义。现列举几种应用如下：

（1）计算磁通

根据斯托克斯定理可得

$$\Phi = \int_a \boldsymbol{B}\mathrm{d}\boldsymbol{a} = \int_a \mathrm{rot}\boldsymbol{A}\mathrm{d}\boldsymbol{a} = \oint_\Gamma \boldsymbol{A}\mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{5.2-47}$$

这就是说，通过曲面 a 的磁通等于磁矢位沿这个面的边界线的闭合线积分。这常常比用磁通密度 B 计算容易得多。对于平行平面场，两点间磁矢位差的绝对值就是在 z 轴单位长度范围内两点之间的磁通量。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

(2) 计算感应电动势

$$e=-\frac{\partial \Phi}{\partial t}=-\frac{\partial}{\partial t}\oint_{S} \boldsymbol{A}\mathrm{d}\boldsymbol{l}=-\oint_{\Gamma}\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t}\mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{5.2-48}$$

由于 $-\partial A/\partial t$ 代表由磁场交变引起的感应电场强度，所以它的线积分代表感应电动势。这实质上就是麦克斯韦第二方程的积分形式。

(3) 画二维磁场

二维磁场的 $\boldsymbol{B}$ 只有两个分量，比如说 B_x 和 B_y，而 $\boldsymbol{A}$ 只有一个分量 A_z，简写为 A。在二维场中，磁力线就是等 A 线。

6.1.4 永磁体的面电流模型

永磁电机电磁场计算首先要建立永磁体的数学模型。电流与磁场的基本关系表明，任何磁场都可以认为是由分布电流产生的。永磁体有两种电流模拟方法：①在永磁体区域内充满电流的模拟——体电流模拟；②仅在永磁体边界上存在电流的模拟——面电流模拟。

经预先磁化的永磁体，不但具有剩余磁化强度 $\boldsymbol{M}_r$，而且还能被外磁场磁化，其特性满足

$$\boldsymbol{B}=\mu_0(\boldsymbol{H}+\boldsymbol{M})=\mu_0(\boldsymbol{H}+\boldsymbol{M}_r+\boldsymbol{M}') \tag{5.2-49}$$

式中，$\boldsymbol{H}$ 为永磁体工作点的磁场强度；$\boldsymbol{B}$ 为永磁体工作点的磁感应强度；$\boldsymbol{M}'$ 为永磁体的感应磁场强度，一般情况下是永磁体工作点磁场强度的函数，即

$$\boldsymbol{M}'=\chi\boldsymbol{H} \tag{5.2-50}$$

式中，χ 为永磁体的磁化因数，它与相对回复磁导率 μ_r 之间存在固定关系，$\mu_r=1+\chi$。将式(5.2-50)代入式(5.2-49)得

$$\boldsymbol{B}=\mu_r\mu_0\boldsymbol{H}+\mu_0\boldsymbol{M}_r \tag{5.2-51}$$

上式既适用于各向同性材料，又适用于各向异性材料。区别在于：对于前者，μ_r 是一个标量；对于后者，μ_r 是一个矢量。对上式两边取旋度，并考虑永磁体内无宏观电流，则有

$$\mathrm{rot}\left(\frac{\boldsymbol{B}}{\mu_r\cdot\mu_0}\right)=\mathrm{rot}\left(\frac{\boldsymbol{M}_r}{\mu_r}\right) \tag{5.2-52}$$

上式右端具有电流密度的量纲，它体现了永磁体的励磁作用，可用体电流密度 $\boldsymbol{J}_p$ 来表示，即

$$\boldsymbol{J}_p=\mathrm{rot}\left(\frac{\boldsymbol{M}_r}{\mu_r}\right) \tag{5.2-53}$$

在二维场中，$\boldsymbol{J}_p$ 只有 z 轴分量。

用体电流模拟永磁体，可以考虑永磁体各向异性的磁特性，并全面考虑整个磁场对永磁体磁状态的影响和永磁体本身的磁特性，这与实际情况比较接近。但是，这种模型的磁导率和体电流需在求解过程中逐步迭代确定，求解过程比较复杂，而且收敛的稳定性较差。

如果永磁体被均匀磁化，磁体内部各点上的 $\boldsymbol{M}_r$ 的大小及方向都相同，永磁体内的等效体电流密度为零，而在平行于 $\boldsymbol{M}_r$ 的永磁体侧面上，存在一层等效面电流，如图 5.2-24 所示。这是由于永磁体与其以外区域的交界面上，$\boldsymbol{M}_r$ 出现不连续，$\boldsymbol{M}_r$ 的旋度不再为零。等效面电流可用面电流密度 $\boldsymbol{J}_s$ 来表示

$$\boldsymbol{J}_s=\frac{\boldsymbol{M}_r\times\boldsymbol{n}}{\mu_r} \tag{5.2-54}$$

式中，$\boldsymbol{n}$ 为永磁体侧面外法向单位矢量。



图 5.2-24 永磁体的面电流模型

用磁矢位描述场时，在模拟永磁体的等效面电流层与其他媒质的交界线上，满足以下交界条件

$$\left(\nu_1\frac{\partial A}{\partial n}\right)\Big|_{\Gamma}-\left(\nu_2\frac{\partial A}{\partial n}\right)\Big|_{\Gamma}=J_s \tag{5.2-55}$$

式中，l 为永磁材料的等效面电流层与其他材料的交界。内部交界条件的处理与普通的第二类边界条件处理有所不同。第二类边界条件仅与内侧单元有关，而内部交界条件与两侧单元有关。通常有限元离散过程是按单元顺序完成的，但在内部交界面上一侧的单元作用无法形成右端项，要由两侧单元才能确定。因此，要按下列方式处理内部交界条件。如图 5.2-25 所示，与交界面有关的项为

$$W_e^-=\int_l\left(\nu_1\frac{\partial A}{\partial n}\right)A\mathrm{d}l$$

$$W_e^+=\int_l\left(-\nu_2\frac{\partial A}{\partial n}\right)A\mathrm{d}l$$

$$W_e=W_e^-+W_e^+=\int_l\left[\left(\nu_1\frac{\partial A}{\partial n}\right)-\left(\nu_2\frac{\partial A}{\partial n}\right)\right]A\mathrm{d}l=\int_l J_sA\mathrm{d}l \tag{5.2-56}$$

式中，W_e 为交界面总的能量函数；W_e^- 为交界面左面的能量函数；W_e^+ 为交界面右面的能量函数；ν_1、ν_2 分别为左右交界面的磁阻率。

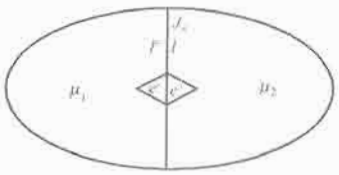


图 5.2-25 交界条件的处理

6.1.5 永磁体平行充磁和径向充磁的模拟

在永磁直流电动机、表面式永磁同步电动机和无刷直流电动机中，瓦片形磁极应用最广，瓦片形磁极有平行充磁和径向充磁两种，如图 5.2-26 所示。平行充磁时，磁化方向平行于瓦片形磁体的中心线，沿磁体表面 AB 与 CD 的电流层方向相反，其大小为

$$J_{SR}=J_s\cos\frac{\alpha}{2} \tag{5.2-57}$$

式中，α 为瓦片形磁体的机械夹角；J_s 为式 (5.2-54) 中等效面电流密度的值。

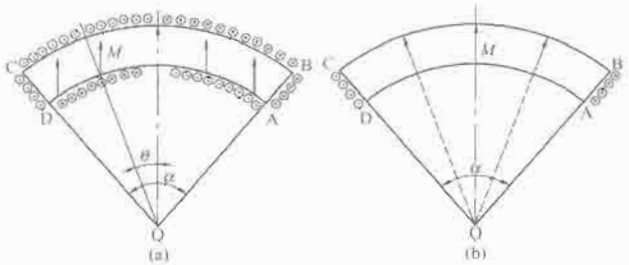


图 5.2-26 平行充磁和径向充磁

(a) 平行充磁；(b) 径向充磁

沿 BC 和 AD 边的磁化强度矢量 $\boldsymbol{M}$ 和 $\boldsymbol{n}$ 法向矢量是连续变化的，其变化的电流层可用下式表示

$$J_{SC}=J_s\sin\theta \tag{5.2-58}$$

式中，θ 为 BC 和 AD 边上某点处 $\boldsymbol{M}$ 沿逆时针转向 $\boldsymbol{n}$ 所构成的夹角。

径向充磁时瓦片形磁极各点的磁化强度矢量 $\boldsymbol{M}$ 均为径向，沿 BC 和 AD 边上的电流层为

$$\boldsymbol{J}_{SC}=\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{n}=0 \tag{5.2-59}$$

在 AB 和 CD 边上，$\boldsymbol{M}$ 与 $\boldsymbol{n}$ 的夹角与 α 无关，恒为 90°，其电流层为

$$J_{SR}=J_s \tag{5.2-60}$$

图 5.2-27 (a) 和 (b) 分别为一台永磁电机平行充磁和

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

径向充磁时磁场分布。通过对某台永磁电机的计算发现，对于极弧因数为 0.6～0.9 的 2 极电机，径向充磁时每极磁通量比平行充磁时高出 17%～33%，随着极数增加，两者趋于接近。

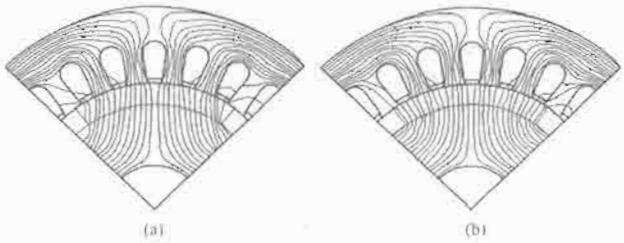


图 5.2-27　平行充磁和径向充磁时磁场分布
(a) 平行充磁；(b) 径向充磁

6.2　永磁电机参数计算

由于数值计算时两个大数相减会减少有效数字的位数，应尽量避免两个大数相减。为提高计算精度，经实践，推荐下列计算方法。

6.2.1　气隙磁感应强度

利用电磁场计算结果，可以求得电机气隙磁感应强度的分布情况。如图 5.2-28 所示，设在定子铁心和气隙交界面上共有 n 个节点，第 k 个节点与第 $k+1$ 个节点之间的圆弧长度为 b_k，依此类推。当剖分足够细时，可以认为在第 k 段弧上的径向气隙磁感应强度为

$$B_{tk}=\frac{A_k-A_{k+1}}{b_k} \tag{5.2-61}$$

式中，A_k、A_{k+1} 分别为第 k 个节点与第 $k+1$ 个节点处的磁矢位。

节点 k 处的径向磁感应强度可通过节点 k 左、右两条单元边上径向磁感应强度的加权平均得到

$$B_k=\frac{b_{k-1}B_{tk-1}+b_kB_{tk}}{b_{k-1}+b_k} \tag{5.2-62}$$

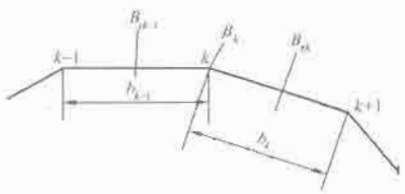


图 5.2-28　定子内表面节点

对径向气隙磁感应强度进行谐波分析，可得到气隙磁感应强度的基波和各次谐波幅值，图 5.2-29 给出了一台样机气隙磁感应强度及其基波的分布曲线。

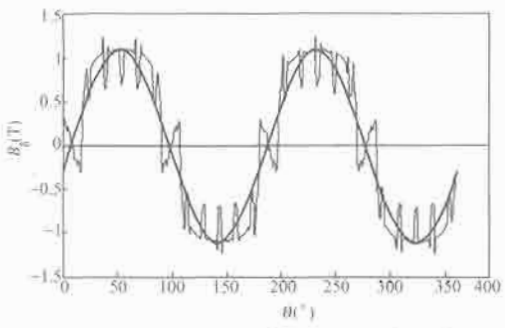


图 5.2-29　气隙磁感应强度分布曲线

6.2.2　空载励磁电动势

空载励磁电动势可通过计算空载气隙磁感应强度和相绕组磁链等方法求得。但用式（5.2-61）求 B 时出现了两个大数相减，要尽量避免。此处介绍一种计算简便、精度较高的方法——根据定子内圆上节点磁矢位的傅里叶分解，直接计算励磁电动势。

以一个周期内定子内表面上节点的磁位 A_1、A_2、…、A_{n-1} 为纵坐标进行傅里叶分解，得到分布曲线为

$$A(x)=\frac{a_0}{2}+\sum_{\nu=1}^{\infty}\left(a_\nu\cos\frac{\nu\pi}{l}+b_\nu\sin\frac{\nu\pi}{l}\right) \tag{5.2-63}$$

式中，l 为半周期的圆弧长（每极）。

由于两点间磁矢位差的绝对值就是单位长度内两点之间的磁通量，所以上式第一个余弦项系数 a_1 代表电机单位长度每极 q 轴基波磁通的 1/2，正弦项系数 b_1 代表电机单位长度每极 d 轴基波磁通的 1/2。这样，每极下空载基波气隙磁通为

$$\Phi_{10}=2l_{ef}\sqrt{a_1^2+b_1^2} \tag{5.2-64}$$

空载励磁电动势为

$$E_0=\sqrt{2}\pi fNK_{dp1}\Phi_{10} \tag{5.2-65}$$

式中，f 为电机频率；N 为电枢绕组每相串联匝数。

利用上述方法可方便地求出不同负载情况下，直、交轴基波气隙磁通和直、交轴励磁电动势。

6.2.3　电枢反应电抗与负载励磁电动势

永磁同步电动机电枢反应电抗 X_{ad} 和 X_{aq} 的计算方法与电励磁电机不同。永磁体的励磁作用是固定存在的，没有电励磁的“开路”和“短路”状态，因而不考虑永磁体作用的计算方法显然没有实际意义。同时，电枢磁动势不同，电动机内磁场的饱和程度就不同，因而电枢反应电抗也就不同；而且直、交轴磁路同时经由定、转子齿部和轭部闭合，因而直、交轴磁路之间的相互影响也不容忽略。电抗参数必须根据永磁同步电动机内部磁场的实际分布状态来求取。为此，需要用“负载法”准确计算永磁同步电动机的电枢反应电抗。具体过程如下：

（1）额定负载场的计算

对于电流已知的情况，电磁场数值计算比较直观，只要改变 ψ，即可计算电机的不同运行状态。但一般电机都是端电压已知，而满足一定端电压 U_0 的电流 I_m 只有通过解场以后才能得到。可以先假设一个电流的幅值与 ψ 角，解场求得直、交轴电动势，然后根据图 5.2-30 所示的永磁同步电动机相量图，通过相量运算求得相应电压 U，再求得电动机的电磁功率 P_{em}。如果所求出的电压和功率与额定值之差大于预先给定的误差，则需修改假定值，重新计算。如此经过若干次迭代，得到满足端电压 U_0 的额定电流 I_m。其迭代过程如图 5.2-31 所示。

（2）电枢反应电抗与负载励磁电动势

求出额定负载磁场之后，对定子内圆表面节点磁位进行谐波分析，得到基波的正弦项系数 b_1 和余弦项系数 a_1，它们分别代表单位长度内 d、q 轴每极基波磁通的 1/2。额定负载时基波气隙磁通 Φ_{1N}、内功率角 θ_1 和气隙合成电动势 E_δ 可由下式求出

$$\Phi_{1N}=2l_{ef}\sqrt{a_1^2+b_1^2} \tag{5.2-66}$$

$$\theta_1=\arctan\frac{a_1}{b_1} \tag{5.2-67}$$

$$E_\delta=\sqrt{2}\pi f\Phi_{1N}NK_{dp1} \tag{5.2-68}$$

根据电动机的相量图，气隙合成电动势的 d、q 轴分量可以分别表示为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

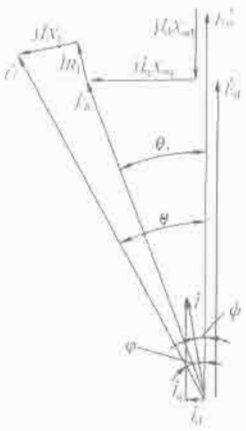


图 5.2-30 永磁同步电动机相量图

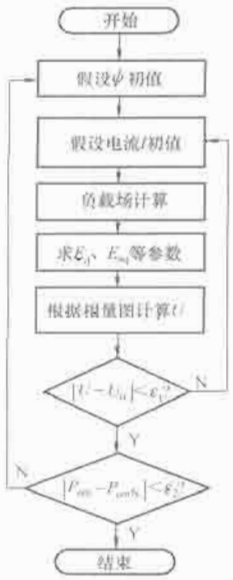


图 5.2-31 负载法迭代过程

$$E_{\delta}\cos\theta_1 = E'_0 + IX_{ad}\sin\psi \tag{5.2-69}$$

$$E_{\delta}\sin\theta_1 = IX_{aq}\cos\psi \tag{5.2-70}$$

这样，交轴电枢反应电抗可以通过式（5.2-70）求出，但对于式（5.2-69）有两个未知量：负载励磁电动势 E'_0 和直轴电枢反应电抗 X_{ad}。为此，在额定工作点附近再取一点，计算相应的磁场，得出

$$E'_{\delta}\cos\theta'_1 = E'_0 + I'X_{ad}\sin\psi' \tag{5.2-71}$$

联立求解式（5.2-71）和式（5.2-69）即可得出负载励磁电动势 E'_0 和直轴电枢反应电抗 X_{ad}。事实上，通过计算运行范围内所有点的磁场，可以得到任意负载下的电枢反应电抗 X_{ad} 和 X_{aq}。

6.2.4 漏磁因数和波形因数

对于图 5.2-32 所示的径向磁场电机，将磁场计算所得的定子内圆节点磁矢位分解，得到其基波幅值即单位长度内每极基波磁通的一半，则

$$\Phi_1 = 2L_{ef}\sqrt{a_1^2 + b_1^2} \tag{5.2-72}$$

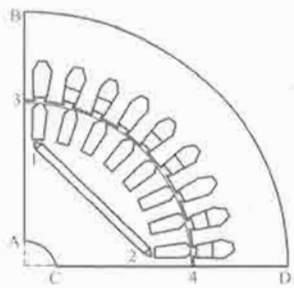


图 5.2-32 电机冲片示意图

气隙磁场的波形因数为

$$K_{\Phi} = \frac{\Phi_1}{\Phi_{\delta}} = \frac{2\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{|A_3 - A_4|} \tag{5.2-73}$$

漏磁因数为永磁体提供的总磁通 Φ_m 与进入电枢的气隙主磁通 Φ_{δ} 之比

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_{\delta}} = \frac{|A_1 - A_2|}{|A_3 - A_4|} \tag{5.2-74}$$

式中，A_1、A_2、A_3、A_4 为节点 1、2、3、4 的磁矢位值；Φ_1 为气隙基波磁通。

对于其他结构的电机，漏磁因数和磁场波形因数的计算方法相似。

7 钕铁硼永磁电机的高温失磁问题

目前，影响钕铁硼永磁电机进一步推广应用的一个主要因素是钕铁硼永磁电机在高温下有可能失磁。

钕铁硼永磁材料有许多优点，但其不足之处是：居里温度较低，一般约为 310～410℃；温度系数较高，B_r 的温度系数 α_{Br} 可达−0.13%/K，H_{cj} 的温度系数 α_{Hcj} 达−0.6%/K 左右。较高的温度系数造成其磁性能热稳定性较差，在高温下使用时其退磁曲线的下半部分要产生弯曲，如图 5.2-8 所示。

永磁电机在运行时，由于损耗发热，通常会使电机的温度升高。在起动、反向、突然短路等情况下，会有几倍额定值的电流，在电机内产生退磁磁场，使永磁体的工作点急剧下降。如果最高工作温度时的退磁曲线不是直线，当退磁磁场强度超过一定值，工作点低于退磁曲线的拐点时将产生不可逆退磁，称为失磁。为防止失磁，需要遵守下列设计原则。

（1）要求钕铁硼永磁材料满足高温性能

为防止失磁，电机设计时首先要正确选用钕铁硼永磁材料。不仅对在室温下钕铁硼永磁材料的基本性能（如 B_r、H_{cj}、H_K 等）提出要求，还应对 B_r 和 H_{cj} 的温度系数，特别是在电机最高工作温度时退磁曲线的直线性提出明确要求。如果由于种种原因，材料生产厂不能保证最高工作温度时退磁曲线为直线，则应对拐点的位置有明确的限定（例如拐点处的磁通密度与该工作温度时的剩磁之比不得大于 10%或 20%），并且通过高温下实际检测来保证拐点位置不高于限定值。

（2）最高工作温度时最大去磁工作点高于高温（铁氧体永磁电机为最低工作温度时）退磁曲线的拐点

钕铁硼永磁电机设计时应计算出在最高工作温度时有可能发生的最大去磁电流情况下的永磁体工作点，使其高于所选用永磁材料的拐点，并留有充分的余量。在满足这一设计原则的基础上，才能追求永磁材料的最佳利用，而不是选用最大磁能或最大有效磁能的最佳工作点。如果计算的最大去磁工作点低于永磁材料的拐点，则应加大永磁体磁化方向长度来提高永磁体的工作点。

（3）用电磁场分析计算局部工作点

通常用路的方法求得的永磁体工作点是平均工作点，不能准确反映永磁体的实际工作点，这是由于：①只考虑电枢磁动势对永磁体的平均去磁，而无法计及对永磁体的局部去磁；②无法计及永磁体之间的相互作用对永磁体工作点的影响；③只涉及永磁体外磁路平均磁导，未计及外磁路局部磁导的不同所引起的永磁体局部工作点的差异；④未计及交轴电枢磁动势对永磁体平均工作点及局部工作点的影响。因而，假定用路的方法计算出的最大去磁工作点 a_{mk} 高于永磁体退磁曲线的拐点 a_{mk}，得到电机永磁体不会失磁的结论，而实际上永磁体的某局部工作点可能低于 a_{mk}，从而发生局部失磁。

永磁电机中永磁体的局部失磁问题，需要借助电磁场数值计算才能进行准确分析，图 5.2-33 和图 5.2-34 给出了 4 极径向结构和 8 极切向结构电机发生最大去磁时的局部工作点分布图。从图中可以看出，两种典型结构永磁体局部工作点的分布都低于路计算出的平均最大去磁工作点。因此应以最大去磁发生时的最低局部工作点作为考核电机抗去磁能力的依据。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

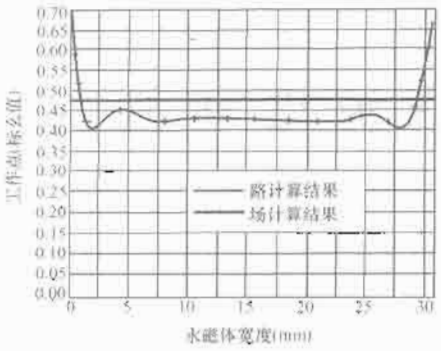


图 5.2-33　4 极径向结构永磁体
（最大去磁时局部工作点分布图）

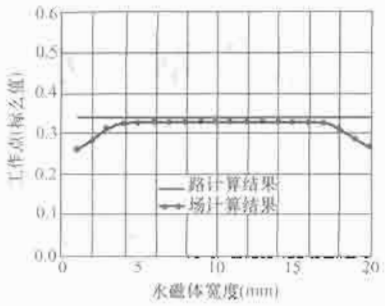


图 5.2-34　8 极切向结构永磁体
（最大去磁时局部工作点分布图）

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第3章 永磁直流电动机

1 概述

1.1 功能和发展概况

永磁直流电动机是由永磁体建立励磁磁场的直流电动机。它除了具有一般电励磁式直流电动机所具有的良好的机械特性和线性的调节特性以及调速范围宽和便于控制等特点外，还具有体积小、效率高(无励磁损耗)、结构简单和运行可靠等优点。

目前永磁直流电动机的功率范围从几个毫瓦到数百千瓦，并有相应的成熟系列产品。从永磁体应用的角度讲，主要有铝镍钴永磁、铁氧体永磁和稀土永磁直流电动机，而稀土永磁则以钕铁硼永磁直流电动机为主。小功率永磁直流电动机以其高效率、低成本的优良特性，占据了小功率直流电机的主导地位。据资料介绍，500W以下的直流电机中，永磁电机占92%，而10W以下的永磁电机占有率高达99%。

随着现代工业的发展，永磁直流电动机有了更为广泛的应用领域，以铁氧体为主的小功率永磁直流电动机，广泛应用于家用电器、音响、通信产品、健身器材、医疗器械、工业驱动、电动自行车、摩托车、机器人等行业，而汽车工业是最大的用户。稀土永磁直流电动机则多应用于某些具有高性能或特殊环境要求的行业，如军事用途的航空、航天、火炮、雷达、导弹等，工业用途的石油行业、烟草机械、数控机床等。随着稀土永磁材料价格的降低、电机性能要求的提高，稀土永磁直流电动机正在某些领域替代铁氧体永磁直流电动机。作为永磁直流电动机重要分支的永磁直流伺服电动机，由于变频调速系统、永磁交流伺服系统的迅猛发展，其市场占有率在逐渐降低。

1.2 分类、特点

永磁直流电动机按用途可分为驱动用永磁直流电动机和控制用永磁直流伺服电动机。按运动方式可分为旋转式和直线式。旋转式永磁直流电动机在结构上又可分为有槽结构和无槽结构以及有铁心和无铁心结构。

本章以普通永磁直流电动机为典型进行分析，其主要内容可推广应用于其他结构的永磁直流电动机。

介绍几种永磁直流电动机的基本结构型式及特点。

1) 普通型永磁直流电动机。这类电机除采用永磁体励磁外，在结构上与电磁式直流电动机无太大区别，作为驱动控制系统中的执行组件，其功率范围从几瓦至数百千瓦；特点是输出功率大、过载能力强、运行可靠、用途广泛。

2) 永磁直流力矩电动机。这类电机为扁平多极结构，电枢槽数较多，槽楔为铜板，一端兼作换向片。它的特点是可长期堵转或在低速状态下运行并产生足够大的转矩，可以不经齿轮减速直接驱动负载。

3) 无槽电枢永磁直流电动机。如图5.3-1所示，电枢铁心为光滑的导磁圆柱体，绕组在圆柱体表面编织而成，并用环氧树脂黏牢、灌封。为了降低惯量，提高转矩和减小机械时间常数，电枢设计成细长型。由于气隙较大，一般采用高性能的永磁材料和聚磁的定子结构。特点是电枢惯量小、机电时间常数小、换向良好、无齿槽效应、运转平稳、噪声小，适用于高速运转、快速起停和功率较大的控制系统。

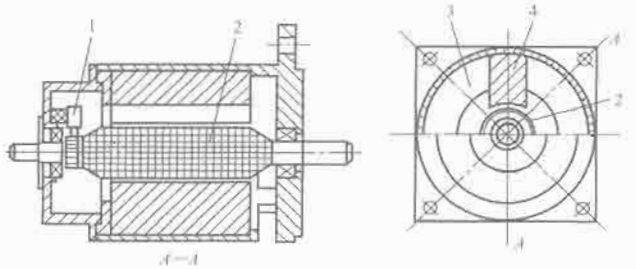


图5.3-1 无槽电枢结构
1—电刷组件；2—电枢；3—永磁体；4—磁极

4) 空心杯电枢永磁直流电动机。如图5.3-2所示，电机电枢用导线绕制固化成杯形，绕组型式有直绕组、斜绕组、同心式、钟形绕组等。结构按永磁体与电枢杯相对位置的不同分为内定子磁极和外定子磁极两种结构型式。由于电枢无铁心、无齿槽，具有损耗小、效率高、惯量小、机电时间常数小、响应快速、运行平稳等优点，适用于功率较小场合。缺点是漏磁大，制造工艺复杂。

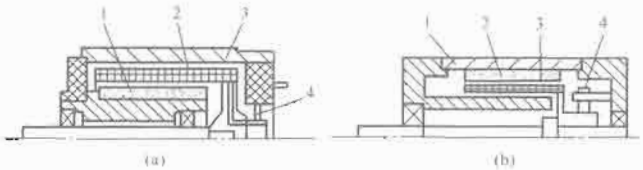


图5.3-2 空心杯电枢永磁直流电动机
(a) 内定子磁极结构；(b) 外定子磁极结构
1—永磁体；2—电枢杯；3—机壳；4—电刷

5) 印制绕组永磁直流电动机。如图5.3-3所示，电机为轴向磁路，结构扁平。电枢绕组采用敷铜板腐蚀成形或铜板冲制、复合、固化而成形，呈圆盘状，绕组有效部分兼作换向器。定子永磁体为扇形或圆柱形，可根据需要设计为单面或双面分布。由于无铁心、无铁损耗，效率较高，功率范围较大，电枢没有齿槽，转矩波动小，运行平稳，还具有惯量小、机电时间常数小和响应快速等特点。但由于电枢与电刷直接接触摩擦，影响了使用寿命。

6) 绕线盘式永磁直流电动机。如图5.3-4所示，绕线盘式电动机是在印制绕组电动机的基础上发展起来的一种结构新颖的电动机。与印制绕组电动机的主要区别在于电枢结构。其电枢结构是用绕制好的线圈按设计要求排列，并用环氧树脂灌封成型，形状为圆盘状。定子结构和性能特点与印制绕组电动机的相同。由于其换向器使用了传统电机的结构，使

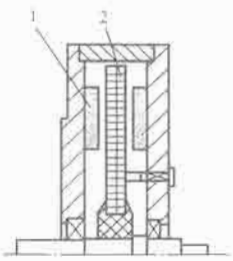


图5.3-3 双面永磁体印制绕组永磁直流电动机结构
1—永磁体；2—电枢

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

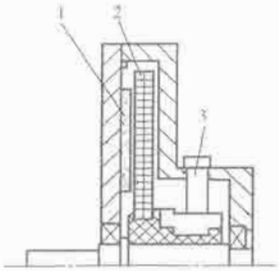


图 5.3-4　单面永磁体线绕盘式永磁直流电动机结构
1—永磁体；2—电枢；3—电刷

之较印制绕组电动机有更长的使用寿命。

2　基本工作原理和结构

2.1　基本工作原理

永磁直流电动机的基本工作原理与一般电磁式直流电动机相同。它是一类建立在电磁感应原理基础上的机电能量转换装置，主要的区别在于其磁场由永磁体提供。当电枢绕组通过电流时，在磁场的作用下产生电磁转矩 T_{em}，电枢绕组在磁场中运动产生感应电动势 E_a，这是永磁直流电动机机电能量转换的基本原理。电磁转矩 T_{em}（N·m）和感应电动势 E_a（V）的计算公式为

$$T_{em}=\frac{pN}{2\pi a}\Phi I_a=K_T I_a \tag{5.3-1}$$

$$E_a=\frac{pN}{60a}\Phi n=K_E n \tag{5.3-2}$$

式中，p 为极对数；N 为电枢总导体数；a 为电枢绕组并联支路对数；Φ 为每极气隙磁通，Wb；I_a 为电枢电流，A；n 为电枢转速，r/min；K_T 为转矩常数，N·m/A；K_E 为电动势常数，V/(r/min)。

$$K_T=\frac{pN}{2\pi a}\Phi \tag{5.3-3}$$

$$K_E=\frac{pN}{60a}\Phi \tag{5.3-4}$$

当气隙磁通不变时，K_T、K_E 均为常数，且 $K_T=9.549K_E$。

稳态运行时永磁直流电动机的电压方程为

$$U=E_a+I_aR_a+\Delta U \tag{5.3-5}$$

$$=K_E n+\frac{T_{em}}{K_T}R_a+\Delta U \tag{5.3-6}$$

式中，R_a 为电枢电阻，Ω；ΔU 为电刷接触电压降，V，一般为 0.5～2V。

从式（5.3-6）中可以看出，当电动机负载转矩一定时，电动机转速随电枢端电压提高而线性上升；当电机端电压不变时，电动机的转速随负载转矩增加而线性下降。这就是永磁直流电动机的基本特性。

2.2　结构

图 5.3-5 为普通永磁直流电动机的结构图。

与电励磁直流电动机相比，其主要差别在于磁极结构。

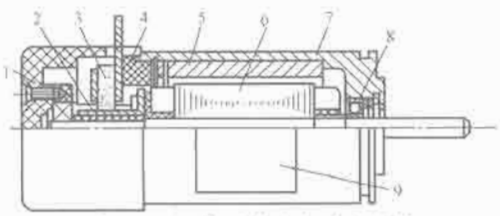


图 5.3-5　永磁直流电动机结构
1—端盖；2—换向器；3—电刷；4—电刷架；5—永磁磁极；6—电枢；7—机壳；8—轴承；9—铭牌

而直流电动机的电刷结构则直接影响着电机的运行稳定性和可靠性。下面就永磁直流电动机的磁极结构及电刷结构分别进行介绍。

2.2.1　磁极结构

目前，永磁直流电动机用永磁材料主要有 3 类，即铝镍钴永磁、铁氧体永磁和稀土永磁。由于它们性能上的不同特点，因此在磁极型式上也应采用与其相适宜的不同结构。

铝镍钴永磁具有剩余磁通密度 B_r（T）高（1.1～1.3）、磁感应强度矫顽力 H_c（kA/m）低（36～150）的特点，结构上一般设计成磁极面积小，磁化方向长度大的细长形状；铁氧体永磁 B_r 较小（0.2～0.44）、H_c 较高（120～320），可设计成磁极面积大，磁化方向较短的结构；而稀土永磁的 B_r、H_c 都很高（0.6～1.3、320～930），磁极结构设计上就有很强的灵活性，相比较而言，磁极面积和长度都可设计得较小。

结合具体电机的性能、外形、结构和成本等不同要求以及永磁体的特点，永磁直流电动机采用不同型式的磁极结构，常用的有圆筒形、瓦片形、弧形和矩形结构。

图 5.3-6 为圆筒形磁极结构，应用永磁材料有铝镍钴、铁氧体、黏结稀土永磁等，永磁材料利用率不高，但装配方便，尺寸精度高，适合大批量生产。体积和功率小（外形 ϕ50 以下，功率至几十瓦）的电机多采用此结构。

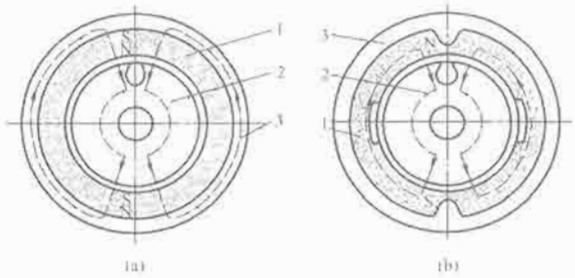


图 5.3-6　圆筒形磁极结构
1—永磁体；2—电枢；3—机壳

图 5.3-7 所示的弧形磁极结构，主要优点是可提高抗去磁能力，减小电机堵转和突然反转时电枢反应的去磁作用。

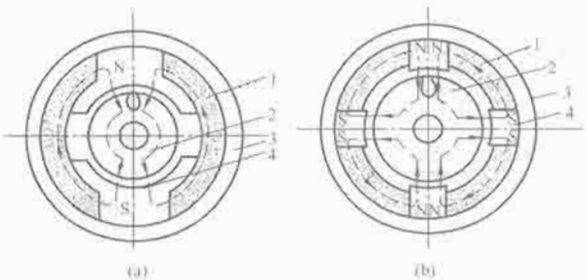


图 5.3-7　弧形磁极结构
1—永磁体；2—电枢；3—机壳；4—磁极

图 5.3-8（a）为瓦片形磁极结构，应用永磁材料多为铁氧体永磁体及稀土永磁体，电机功率可达十几千瓦。而图 5.3-8（b）所示结构的永磁直流电动机功率范围为几千瓦至几百千瓦。

图 5.3-9 为矩形磁极结构，多用于外形、性能要求较为特殊的场合。图 5.3-9（a）结构更能发挥稀土永磁的优势。

永磁直流电动机磁极结构按照永磁体极化方向与电枢旋转方向的关系，又可分为径向式和切向式。图 5.3-6（b）、图 5.3-7、图 5.3-9（a）为切向式磁路，选用的机壳材料应

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

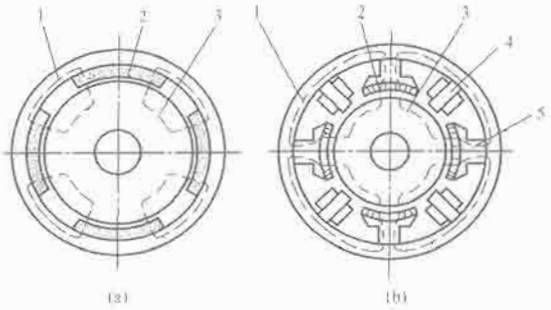


图 5.3-8 瓦片形磁极结构
(a) 径向式结构；(b) 带换向极径向式结构
1—机壳；2—稀土永磁体；3—转子；4—换向极；5—主极

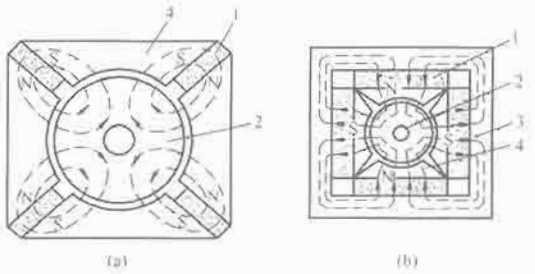


图 5.3-9 矩形磁极结构
(a) 隐极式多极结构；(b) 凸极式多极结构
1—永磁体；2—电枢；3—机壳；4—极靴

为非导磁材料。图 5.3-6 (a)、图 5.3-8、图 5.3-9 (b) 为径向式，机壳材料为导磁材料。

磁极结构还可分为有极靴和无极靴结构。有极靴结构优点是可起聚磁作用，提高气隙磁通密度；缺点是结构复杂，漏磁因数较大，负载时气隙磁场畸变较大。无极靴结构的优点是结构简单，漏磁因数小，材料利用率高；缺点是电枢反应直接作用于永磁体磁极，容易引起不可逆退磁。

2.2.2 电刷结构

由于永磁直流电动机的性能、结构和外形的不同要求，形成了多种多样的电刷结构，在小功率电机中更为明显。下面介绍常用的一些电刷结构及特点。

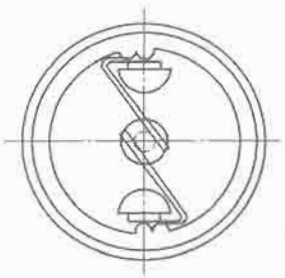


图 5.3-10 金属丝电刷结构

图 5.3-10 为金属丝电刷，多应用在几瓦以下的微电机。其特点是接触压较小，结构简单。常用材料为银铜合金丝、金银铜合金丝、镍金合金丝、金基五元合金丝等。

图 5.3-11 为弹簧片式电刷结构，电刷焊接于弹性金属片上，占用空间小，常用于电机内空间紧张、功率在几瓦的小电机中，永磁直流力矩电机也常用此结构。

图 5.3-12 为拉簧式电刷结构，优点是压力传导可靠；缺点是在电刷磨损的过程中压力变化大，常用于几瓦至几十瓦的电机中。

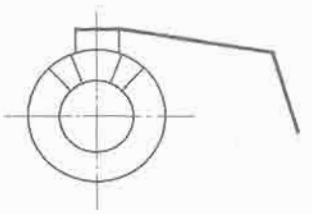


图 5.3-11 弹簧片式电刷结构

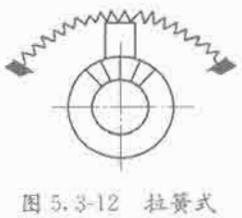


图 5.3-12 拉簧式电刷结构

图 5.3-13 为蜗旋式弹簧电刷结构，图 5.3-13 (a)、(c) 为直压式。图 5.3-13 (b) 为压指式，多应用于几瓦至几十瓦的电机，其优点是压力近似恒压。而直压式对弹簧加工及装配要求较高，否则会造成电刷接触不可靠现象。压指式结构无电刷盒，接触可靠；缺点是随着电刷磨损，中心面有少量偏移。

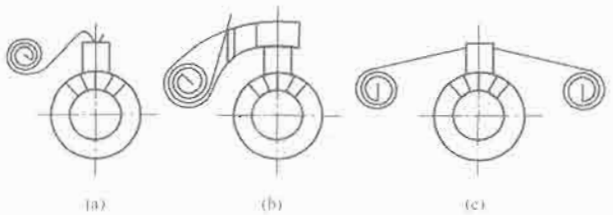


图 5.3-13 蜗旋式弹簧电刷结构

图 5.3-14 为螺旋弹簧直压式电刷结构，普遍用于几瓦至几千瓦的电机中。该结构压力传递可靠，占用径向空间较大，电刷压力随着电刷磨损逐渐减小。

图 5.3-15 为拉簧压指式电刷结构，是几千瓦至几百千瓦直流电机最常用的电刷结构。

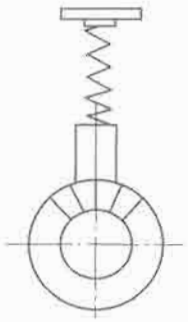


图 5.3-14 螺旋弹簧直压式电刷结构

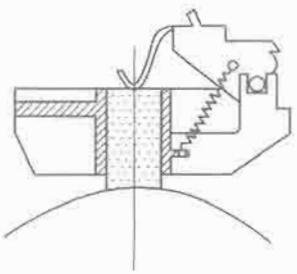


图 5.3-15 拉簧压指式电刷结构

3 基本特性

3.1 额定数据

永磁直流电动机的主要额定数据有：额定电压 U_N (V)；额定电流 I_N (A)；额定功率 P_N (W)；额定转速 n_N (r/min)；额定转矩 T_N (N·m)；效率 η。它们之间存在如下关系

$$P_N = \frac{2\pi}{60} n_N T_N \tag{5.3-7}$$

$$\eta = \frac{P_N}{U_N I_N} \times 100\% \tag{5.3-8}$$

电机运行时，存在如下几个平衡方程：

(1) 电压平衡方程

$$U = E_a + I_a R_a + \Delta U_b$$

即电机端电压为电动势与电枢电阻电压降及电刷电压降之和。

(2) 转矩平衡方程

$$T_{em} = T_2 + T_0 \tag{5.3-9}$$

式中，T_2 为输出转矩或负载转矩；T_0 为与空载损耗对应的转矩，空载损耗主要包括电枢铁心损耗和机械损耗等。当电机空载电流为 I_0 时，有

$$T_0 = K_T I_0 \tag{5.3-10}$$

(3) 功率平衡方程

永磁直流电动机功率平衡方程式为

$$P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{fw} + P_{Cua} + P_b \qquad (5.3\text{-}11)$$

式中，P_1为电动机输入功率，W；P_2为电动机输出的机械功率；P_{Fe}为电枢铁心损耗；P_{fw}为机械摩擦损耗；P_{Cua}为电枢绕组铜损耗；P_b为电刷接触损耗。

3.2　稳态运行特性

3.2.1　机械特性

当电动机端电压一定时，电动机的转速随电磁转矩变化的曲线 $n = f(T_{em})$ 称为永磁直流电动机的机械特性。

由式 (5.3-6) 可得

$$n = \frac{U - \Delta U}{K_E} - \frac{R_a}{K_T K_E} T_{em} \qquad (5.3\text{-}12)$$

当 $n=0$ 时，还可以得到电机的堵转转矩

$$T_k = \frac{U - \Delta U}{R_a} K_T \qquad (5.3\text{-}13)$$

当电动机端电压为不同值时，可得到一组电动机 $n = f(T_{em})$ 曲线，即永磁直流电动机机械特性曲线，如图 5.3-16所示。当电动机端电压不变时，转速随着转矩的增大而线性下降，当下降的斜率较小时，称电动机有较硬的机械特性；反之，称电动机机械特性较软。不同电压下的机械特性曲线为一组平行的直线。

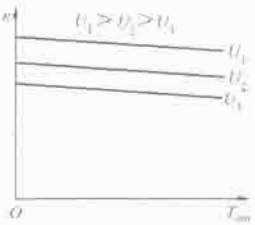


图 5.3-16　永磁直流电动机机械特性曲线

3.2.2　调节特性

当电动机电磁转矩不变时，电动机转速随电压变化的关系 $n = f(U)$ 称为永磁直流电动机的调节特性。

式 (5.3-12) 可写为

$$n = \frac{U}{K_E} - \frac{\Delta U}{K_E} - \frac{R_a}{K_T K_E} T_{em} \qquad (5.3\text{-}14)$$

当 $n=0$ 时，$U = \Delta U + \frac{R_a}{K_T} T_{em}$，此电压值为永磁直流电动机电磁转矩为 T_{em}时的起动电压，即当电动机电磁转矩为 T_{em}时，电动机的端电压应大于起动电压才能转动并达到某一转速。电动机电压从零到起动电压称为某一电磁转矩时永磁直流电动机的失灵区。

当电动机电磁转矩为不同值时，可得到一组 $n = f(U)$ 的关系曲线，如图 5.3-17 所示。当负载转矩一定时，电动机转速随端电压的提高而线性上升，电动机的电动势常数越大，上升的斜率越小。负载转矩不同时，调节特性曲线为一组平行直线。

3.2.3　电流转矩特性

当电动机电压不变时，电动机电枢电流随负载转矩变化的曲线 $I_a = f(T_2)$ 称为永磁直流电动机的电流转矩特性，如图 5.3-18 所示。电动机的电枢电流随负载转矩的增大而线性增大，转矩常数越大，其变化的斜率越小。

由式 (5.3-1)、式 (5.3-9) 和式 (5.3-10) 可得

$$I_a = I_0 + \frac{1}{K_T} T_2 \qquad (5.3\text{-}15)$$

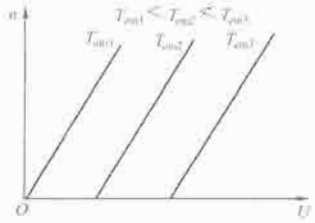


图 5.3-17　永磁直流电动机的调节特性

3.2.4　效率特性

效率特性是指当 $U=U_N$ 时，永磁直流电动机效率 $\eta = f(T_2)$ 的关系曲线，如图 5.3-18 所示。电动机的效率随负载转矩的增大而逐渐提高，在达到最大效率后开始下降。设计合理的电动机的最大效率工作点应在额定转矩、转速附近。

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{T_2 \Omega_r + \sum P} \qquad (5.3\text{-}16)$$

式中，$\sum P$ 为电动机总损耗，W，$\sum P = P_{Fe} + P_{fw} + P_{Cua} + P_b$。

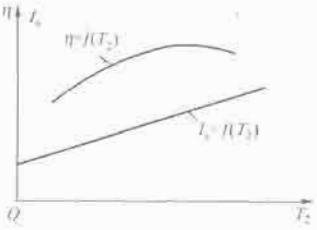


图 5.3-18　永磁直流电动机效率特性、电流转矩特性

4　电枢反应

当永磁直流电动机负载运行时，电枢绕组电流产生的电枢磁动势对气隙磁场的影响称为电枢反应，可分为直轴电枢反应和交轴电枢反应。

4.1　直轴电枢反应

当电刷偏离几何中性面时，就会产生直轴（与磁极中心线重合的轴，又叫 d 轴）电枢反应，如图 5.3-19 所示。当电刷偏移方向与电动机转向一致时，直轴电枢反应直接对永磁磁极起增磁作用，逆向移动时起去磁作用。当电刷偏离几何中性面距离为 b_β时，直轴电枢反应磁动势为

$$F_{ad} = b_\beta A \qquad (5.3\text{-}17)$$

式中，A 为线负荷（或电负荷），$A = \frac{N i_a}{\pi D_a}$，A/m；$D_a$为电枢直径，m；$i_a$ 为电枢导体电流，A。

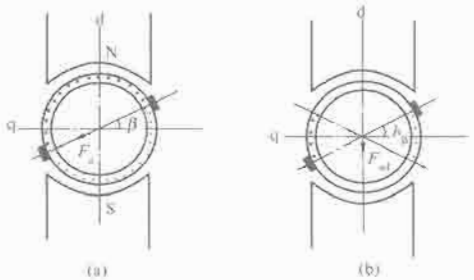


图 5.3-19　电刷偏移时的直轴电枢反应磁动势
(a) 电枢磁动势；(b) 直轴分量

对于小容量电机，由于加工、装配而引起的电刷偏移量 b_{β} 一般取（$1.5\times10^{-4}\sim3\times10^{-4}$）m。

换向元件产生的直轴电枢反应。当永磁直流电动机没有换向极时，一般都属于延迟换向。对于电动机而言，换向元件产生的直轴电枢反应 F_{ac}（A）起增磁作用。但是当电动机突然反转时，电枢电流方向突然改变而转向来不及改变，则换向元件产生的直轴电枢反应为去磁作用。

$$F_{ac}=\frac{b_k N^2 W_c I_a n_N I_a}{120a\pi D_a \Sigma R}\Sigma\lambda\times10^{-8} \qquad (5.3\text{-}18)$$

式中，b_k 为换向区宽度，m；W_c 为换向元件匝数；ΣR 为换向回路总电阻，Ω；$\Sigma\lambda$ 为换向元件比漏磁导，可参考电机设计专业书计算。

因此，永磁直流电动机直轴电枢反应磁动势 $F_{ad}=F_{ad1}+F_{ac}$。

4.2 交轴电枢反应

理想化的永磁直流电动机电枢表面无齿槽，导体在电枢表面均匀连续分布，电枢绕组为整矩，电刷位于几何中性线上，其电枢反应磁动势轴线正好位于交轴（与磁极中心线正交轴，又叫q轴），称为交轴电枢反应磁动势 F_q（A），在距磁极中心线 x（m）处交轴电枢反应磁动势的大小与 x 成正比为

$$F_{ax}=Ax-\frac{\tau}{2}\leqslant x\leqslant\frac{\tau}{2} \qquad (5.3\text{-}19)$$

式中，τ 为永磁直流电动机极距，m。

交轴电枢反应磁动势沿电枢表面呈三角形分布，如图5.3-20所示，在交轴处，即 $x=\pm\frac{\pi}{2}$ 处，交轴磁动势最大，其幅值为

$$F_{aq1}=\pm\frac{A}{2}\tau \qquad (5.3\text{-}20)$$

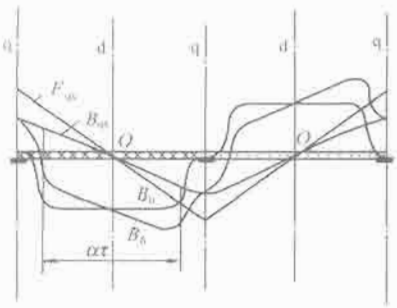


图 5.3-20 电枢磁动势和气隙合成磁场分布

对于磁极无极靴结构的永磁直流电动机，由于空气的磁导率与永磁体的磁导率很接近，所以电枢反应磁场的磁通密度 B_q（T）沿电枢表面呈近似三角波分布而不是马鞍形，其最大磁通密度在交轴上，这也是永磁直流电动机交轴电枢反应与电励磁直流电动机一个很大区别。

依据磁场叠加原理作出电枢反应磁动势和气隙合成磁场分布图5.3-20。分析其对气隙磁场的影响可以得出如下结论，交轴电枢反应磁动势使每个极下的磁场波形发生畸变，在半边磁极下增磁，在另半边磁极下去磁。对于电枢磁路不饱和的电机，增磁量与去磁量相等，每个极下总磁通量不变。而当电枢齿饱和时，一半极增磁的效应要比另一半下去磁的效应要弱一些，表现出一定的去磁效应。但无极靴结构永磁体磁导率接近空气，去磁效应并不大，且很难准确计算，一般不予考虑，主要影响是对换向不利。

对于磁极有极靴结构的永磁直流电动机，交轴电枢反应经气隙和极靴闭合，因此对气隙磁场有一定影响，利用过渡特性曲线可以较方便地确定交轴电枢反应去磁磁动势。

过渡特性曲线是指气隙磁通密度 B_{δ} 对于每极气隙磁动势 F_{δ} 与齿磁动势 F_t 之和的关系曲线，即 $B_{\delta}=f(F_{\delta}+F_t)$，如图5.3-21所示。

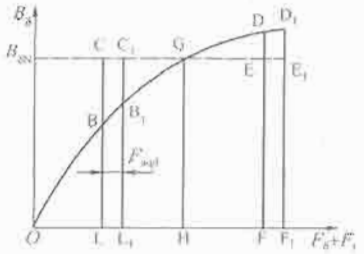


图 5.3-21 过渡特性

首先，绘出电机的过渡特性曲线，在曲线上确定一点G，其纵坐标对应于气隙磁感应强度 B_{δ}，横坐标为H，在H两侧取L和F，且

$$LH=FH=\frac{1}{2}b_i A \qquad (5.3\text{-}21)$$

式中，b_i 为计算极弧宽度，m。

再从L和F两点作横轴的垂线，分别交于过渡特性曲线B、D两点，交 B_{δ} 于C、E两点。由于交轴电枢磁动势从主极中心向两侧极尖是按线性规律变化的，且在主极中心线处为零，在两侧极尖分别为 $b_p A/2$ 和 $-b_p A/2$，若以OH表示由主磁极消耗在气隙和齿上的每极磁动势，则OL和OF分别为被交轴电枢反应去磁和助磁后的极尖合成磁动势，相应地，LB和FD表示对应的气隙磁感应强度，曲线BGD为负载时极靴下的气隙磁感应强度分布。若用矩形LCEF表示空载时气隙磁通，则曲边梯形LBDF则为负载时的气隙磁通。两者之差即为交轴电枢反应去磁磁通。

为求得交轴电枢反应去磁磁动势 F_{aqd}，只要将LF向右平移至 L_1F_1，并使：曲边△C_1B_1G 面积＝曲边△D_1E_1G 面积。这样就得到另一个曲边梯形 $L_1B_1D_1F_1$，其面积等于矩形LCEF面积，即等于空载气隙磁通。因此LF向右平移的距离 LL_1 就为交轴电枢反应去磁磁动势 F_{aqd}，即

$$F_{aqd}=LL_1 \qquad (5.3\text{-}22)$$

4.3 最大去磁反应

当永磁直流电动机处于起动、堵转、突然停转或突然反转等运行状态时，绕组中的电流常常是额定电流的几倍甚至是十几倍，这样大的电流产生的电枢反应去磁作用是很强的，在电机设计中应校核最大去磁工作点，使其位于永磁体退磁拐点之上。

最大去磁磁动势取决于电机可能产生的最大瞬间电流 I_{max}（A），这与电机的运行状态有关，分别计算如下：

电动机起动时，$n=0$，$E_a=0$

$$I_{max}=\frac{U-\Delta U_b}{R_a} \qquad (5.3\text{-}23)$$

电动势突然停转时，$U=0$

$$I_{max}=\frac{E_a-\Delta U_b}{R_a} \qquad (5.3\text{-}24)$$

电动势突然反转时，电枢电压由 $+U$ 突然变到 $-U$，而转速 n 和 E_a 都来不及变化。

$$I_{max}=\frac{U+E_a-\Delta U_b}{R_a} \qquad (5.3\text{-}25)$$

比较式（5.3-23）、式（5.3-24）和式（5.3-25），可以看出，电机突然反转时产生的瞬时电流最大。将 I_{max} 代入上

述交、直轴电枢磁动势计算公式，求出作用于去磁侧磁极极尖处的每对极的最大电枢反应去磁磁动势

$$F_{amax}=2\left(F_{ad}+\frac{\alpha_i\tau}{\tau-2b_\beta}F_{aq}\right) \tag{5.3-26}$$

5　设计要点

永磁直流电动机的设计大部分与电励磁式直流电动机的相同，主要区别在于励磁部分的不同而引起的结构型式和参数取值范围的差异。

磁极结构的选择可根据电机的性能、外形、成本等具体要求，参照本章 2.2 节选择。

由于永磁直流电动机磁极结构的多种多样，磁场分布复杂，所以较电励磁直流电动机的设计计算准确度低。而永磁材料本身性能的分散性直接导致了电机性能的波动较大，且制成后难以调节性能，设计时应充分考虑，留有一定的裕度。

5.1　主要尺寸、参数的选取

永磁直流电动机的主要尺寸与其他直流电动机一样按以下式确定

$$D_a^2L_a=\frac{6.1}{\alpha_i AB_\delta}\frac{P'}{n_N}\quad(\mathrm{m}^3) \tag{5.3-27}$$

式中，P'为计算功率，W，可按下式估算。α_i 为极弧系数，对无换向极电机可取 0.68～0.71，有换向极电机可取 0.63～0.68，电枢直径较大的电机取较高值。

$$P'=\left(\frac{1+2\eta}{3\eta}\right)P_N \tag{5.3-28}$$

电机效率 η 可按图 5.3-22 上限选取。

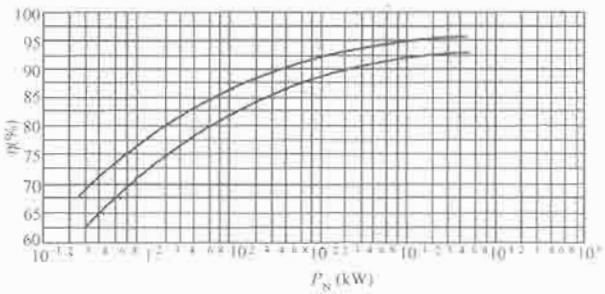


图 5.3-22　直流电机的效率曲线

电机的气隙磁通密度 B_δ 主要由所选用的永磁材料的剩余磁通密度 B_r 决定，初选时可根据永磁材料和磁极结构取 $B_\delta=(0.6\sim0.85)B_r$。

电负荷 A 一般是参考经验数据选取的。图 5.3-23 是 B 级绝缘直流电机的 A 的经验值与 D_a 的关系曲线。

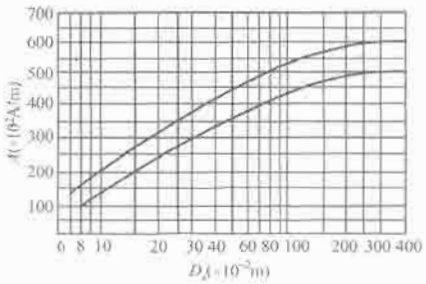


图 5.3-23　直流电机电负荷与电枢直径的关系

电枢直径 D_a 可按图 5.3-24 初选。

上述尺寸、参数初步选定后，由式（5.3-29）即可算出

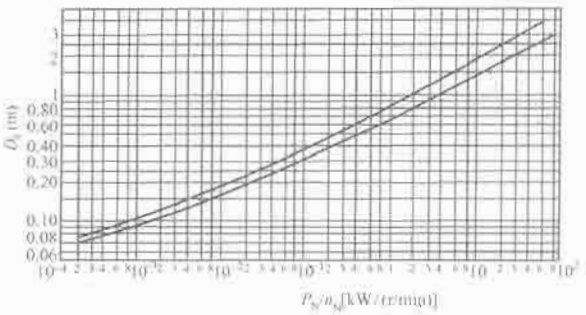


图 5.3-24　直流电机的电枢直径选取

电枢铁心长度（m）。

$$L_a=\frac{6.1}{\alpha_i AB_\delta D_a^2}\frac{P'}{n_N} \tag{5.3-29}$$

还可以用电机的长径比 $\lambda=L_a/D_a$ 来校核 L_a、D_a 的合适性，一般 λ 应取 0.6～1.5，对于永磁直流伺服电动机来讲，为了减小时间常数，λ 可取值至 2.5，若超过了上述范围，可重新选取 D_a。

5.2　磁路计算

5.2.1　几个主要常数及计算参数的确定

1）空载漏磁因数 σ。按下述经验参数选取基本能满足工程设计要求。

对瓦片形永磁体　$\sigma=1.05\sim1.1$

对于圆筒形永磁体　$\sigma=1.1$（$\lambda>1$），$\sigma=1.15$（$\lambda=1$），$\sigma=1.15\sim1.3$（$\lambda<1$）

对于弧形永磁体　$\sigma=1.3\sim1.4$

2）电枢计算长度 L_{ef}（m），如果取永磁体轴向长度 $L_M=L_a$，可近似取 $L_{ef}\approx L_a+2\delta$。

3）计算极弧系数

$$\alpha_i'=\frac{\widehat{b}_p'}{\tau} \tag{5.3-30}$$

式中，τ 为极距，m；$\widehat{b}_p'$ 为计算极弧宽度，m；$\widehat{b}_p'\approx\widehat{b}_p+2\delta$；$\widehat{b}_p$ 为极弧宽度。

4）气隙长度 δ。δ（m）可根据经验按 $\delta=(0.007\sim0.009)D_a$ 确定，同时考虑所选用永磁体的磁感应矫顽力 H_c，H_c 小时 δ 取小些，H_c 大时可取大些。

5）气隙系数 K_δ，对于半闭口槽和半开口槽

$$K_\delta=\frac{t(4.4\delta+0.75b_0)}{t(4.4\delta+0.75b_0)-b_0^2} \tag{5.3-31}$$

式中，t 为电枢冲片齿距，m；b_0 为电枢冲片槽口宽度，m。

5.2.2　磁路设计及工作点确定

以最常见的图 5.3-5 所示结构的永磁直流电动机为例进行分析。

（1）永磁体尺寸的确定

永磁体宽 b_m 选取可按极弧因数 α_i 选取原则确定。

轴向长度一般取 $L_M=L_a$。磁化方向长度 h_M 确定应考虑气隙长度 δ 的大小、电机整个磁路磁动势平衡关系、永磁体加工工艺的可行性、抗最大电流的去磁能力等综合因素进行预估，并根据具体电磁性能计算结果进行调整。一般取 $h_M=(5\sim15)\delta$。

（2）电机磁路磁通密度选取原则

机壳（或机座）磁通密度选取，对于小功率电机的钢板拉伸机壳，一般取 $B_j=1.5\sim1.8$T；对于功率较大的电机的机壳，用铸钢、钢管、钢板弯形等型式，一般取 $B_j=0.95\sim1.3$T。

电枢齿部齿密 B_{t2}，一般取 $B_{t2}=1.7\sim2.0$T。

电枢轭部齿密 B_{j2}，一般取 $B_{j2}=1.0\sim1.6$T。

(3) 永磁直流电动机的等效磁路图

图 5.3-25 为一对极的等效磁路图。

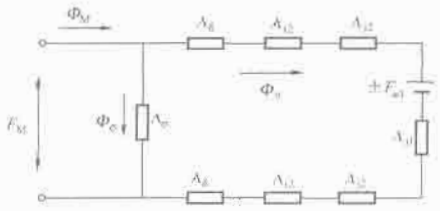


图 5.3-25 一对极的等效磁路图

图中，Λ_δ、Λ_{t2}、Λ_{j2}、Λ_{j1} 和 Λ_σ 分别表示气隙磁导、转子齿磁导、转子轭磁导、定子轭磁导和漏磁导。设 Λ_u 为等效有效磁导

$$\Lambda_u=\frac{1}{\frac{2}{\Lambda_\delta}+\frac{2}{\Lambda_{t2}}+\frac{2}{\Lambda_{j2}}+\frac{2}{\Lambda_{j1}}} \tag{5.3-32}$$

则有

$$\Phi_M=F_M(\Lambda_u+\Lambda_\sigma)-(\pm F_{ad})\Lambda_u \tag{5.3-33}$$

$$\Phi_u=[F_M-(\pm F_{ad})]\Lambda_u \tag{5.3-34}$$

$$\Phi_\sigma=F_M\Lambda_\sigma \tag{5.3-35}$$

空载时，$F_{ad}=0$

则有

$$\Phi_{M0}=F_M(\Lambda_u+\Lambda_\sigma) \tag{5.3-36}$$

$$\Phi_{u0}=F_M\Lambda_u \tag{5.3-37}$$

$$\Phi_{\sigma0}=F_M\Lambda_\sigma \tag{5.3-38}$$

(4) 工作点求解

根据磁路求解及电枢反应的分析，就可以得到永磁直流电动机的永磁体负载工作图，并确定永磁体工作点。

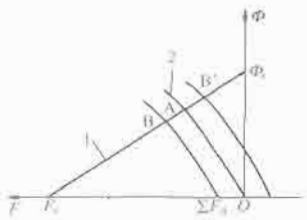


图 5.3-26 永磁体工作点

如图 5.3-26 所示，作出永磁体退磁曲线 1 和空载特性曲线 2，两者交点 A 为永磁体空载工作点，再按总的纵轴电枢反应磁动势 $\Sigma F_d=F_{ad}+F_{aql}$ 平移曲线 2。当 $\Sigma F_d>0$，呈去磁特性，曲线 2 向左平移，得到交点 B。当 $\Sigma F_d<0$，呈助磁特性，曲线 2 向右平移，得到交点 B′。B 或 B′即为永磁体负载工作点。

为了获得较高的永磁体利用率，确定的工作点的 Φ_δ 与 Φ_r 的比值在 0.6～8.5 范围内为较佳的工作点。图中，$\Phi_r=S_MB_r$；$F_c=2h_MH_c$。

对于退磁曲线为非直线或有拐点的永磁体，应校核最大去磁工作点。向左平移图 5.3-26 中曲线 2，移动距离为 F_{amax}，移动后曲线 2 与曲线 1 的交点，应在回复直线或拐点之上。

5.3 电枢绕组及冲片设计

5.3.1 电枢绕组

电枢绕组是永磁直流电动机的一个重要部件，它的设计原则是一定的导体数产生较大电动势，通过一定电流而又尽量节约有色金属及绝缘材料，结构尽量简单，还要兼顾换向性能。永磁直流电动机常用下述两种电枢绕组。

(1) 单叠绕组

单叠绕组是合成节距 $Y=Y_k=\pm1$ 的一种绕组。当 $Y=Y_k=+1$ 时，称为“右”行绕组；$Y=Y_k=-1$ 时，称为“左”绕组。因左行绕组接线互相交叉，用铜较多，很少采用，故叠绕组常用右行绕组，如图 5.3-27 所示。

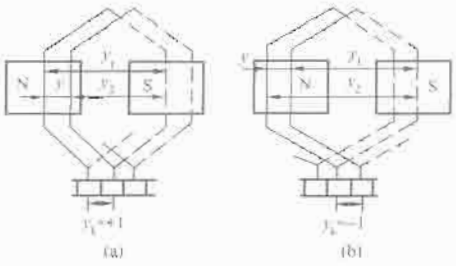


图 5.3-27 单叠绕组在电枢上的串联情况

(a) 右行绕组；(b) 左行绕组

由于单叠绕组的并联支路数等于主极数，即 $2a=2p$，故增加电机的磁极数便可增加支路数，一般应用于正常电压和转速、电流较大的多极电机。对于小功率的两极电极，采用单叠和单波绕组原理上是一样的，a 均等于 1。因单叠绕组下线、接线简单，常采用单叠绕组。

(2) 单波绕组

当绕组满足 $Y_k=Y=(k\pm1)/p=$整数时，称为单波绕组，这也是设计单波绕组时的必要条件。式中取负号时，称为左行绕组；取正号时，称为右行绕组。因右行绕组端接线交叉、较长，故单波绕组常用左行绕组，如图 5.3-28 所示。

单波绕组的 Y_1 与单叠绕组一样，要求接近于极距 τ，但合成节距 $Y=Y_k$ 接近于 2τ（即 $Y_k\approx k/p$），而不能等于 2τ，否则单波绕组不能形成。

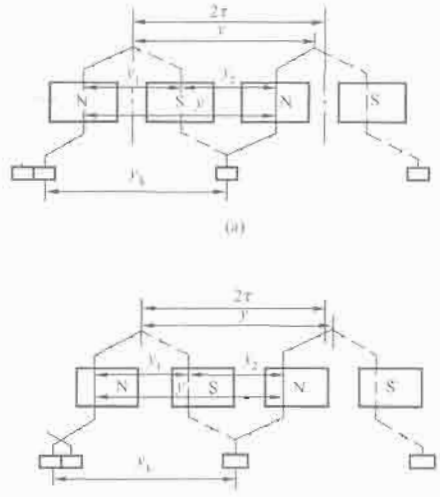


图 5.3-28 单波绕组组件在电枢上的串联情况

(a) 左行绕组；(b) 右行绕组

单波绕组的并联支路数恒等于 2，而与磁极数无关，即 $2a=2$ 或 $a=1$。这是与单叠绕组差别，造成这种差别的根本原因在于它们的连接规律不同。

此外，还有复波、复叠、蛙形等绕组型式，但永磁直流电动机采用较少。

5.3.2 电枢冲片设计

(1) 槽数的选择

通常每一极距上的电枢槽数 $Z/2p$，见表 5.3-1。

表 5.3-1 每极槽数与电枢直径的关系

电枢直径(m)	≤0.3	0.3～0.45	0.45～0.65	0.74～0.99	≥1.2
每极槽数	6～12	7～14	9～20	12～22	14～20

为降低齿槽效应，可采用斜槽，通常斜槽度为（0.5～

1.0）t_2，t_2（m）为电枢齿距。

$$t_2 = \frac{\pi D_a}{Z} \tag{5.3-39}$$

（2）槽形设计

以半闭口梨形槽为例。当 $D_a \leqslant 0.2$m 时且使用圆形导线时，多选用半闭口梨形槽，如图 5.3-29 所示。

槽口宽 b_{02}（m），$b_{02} = 0.002 \sim 0.004$，在保证下线和机械加工方便的条件下，应选小的 b_{02} 值。

槽口高 h_{02}（m），$h_{02} = 0.0005 \sim 0.002$，$h_{02}$ 主要从机械强度和冲模寿命两方面考虑，不能取得太小。

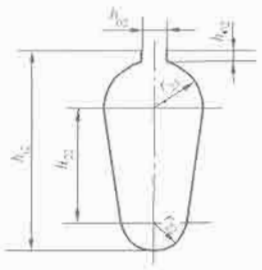


图 5.3-29　半闭口梨形槽

齿宽 b_{t2}（m），按前述齿部磁通密度选取原则选取 B_{t2}，然后确定齿宽 b_{t2}。一般按等齿宽设计槽形。

$$b_{t2} = \frac{t_2 B_\delta l_{ef}}{K_{Fe} B_{t2} l_a}$$

式中，K_{Fe} 为电枢冲片叠压常数，取 $K_{Fe} = 0.92 \sim 0.95$。

轭高 h_{j2}（m），按前述电枢磁通密度选取原则选取 B_{j2}，然后确定轭高

$$h_{j2} = \frac{\Phi'_\delta}{2K_{Fe} B_{j2} l_a}$$

槽高 h_{s2}（m），可按下述经验公式选取，h_1/t_2 一般应不超过 4∶1。

$$\frac{h_1}{D_a} = \frac{0.05 \sim 0.06}{D_a + 0.2}$$

通过计算，可确定槽形其他尺寸 r_{21}、r_{22}、h_{22}。

槽面积

$$A_s = (r_{21} + r_{22}) h_{22} + \frac{\pi}{2}(r_{21}^2 + r_{22}^2) \quad (\text{m}^2)$$

5.3.3　绕组参数

按本章 5.3.1 节选择合适的绕组型式。

电枢总导体数为

$$N = \frac{60aE'_a}{n_N p \Phi_\delta} \tag{5.3-40}$$

$$E'_a = U_N \left(1 - \frac{1 - \eta'_N}{3}\right) \tag{5.3-41}$$

每槽导体数 N_s，$N_s = N/Z$，应调整至接近的偶数。

每元件匝数 W_s，$W_s = N_s/(2u)$，u 为虚槽数。

电流密度 J_a 在 $5 \times 10^6 \sim 13 \times 10^6$（A/m²）范围内选取。

导体截面积

$$A_{Cu} = \frac{I_a}{2aJ_a} \quad (\text{m}^2) \tag{5.3-42}$$

按 A_{Cu} 查取导线直径 d，槽满率 S_f（%）按下式计算

$$S_f = \frac{N_t N_s d^2}{A_s - A_i} \times 100 \tag{5.3-43}$$

式中，A_i 为槽绝缘所占槽面积；N_t 为导线的并绕根数；S_f 一般控制在 75%～80%。

初步设计、计算完成后，应进行工作特性核算，并与规定（或要求）的额定数据、特性对比。若不能满足要求，则应调整设计参数重新设计，直至满足要求为止。

6　永磁直流伺服电动机

永磁伺服电动机是用于运动控制系统中的电动机，其输出参数如位置、速度、加速度或转矩是可控的。它的特点是：有高的起动转矩、小的转矩波动；转动惯量小，调速范围宽，良好的四象限运行特性；线性的机械特性和调节特性，响应快速；价格适中，应用范围广阔。它多用于高性能的精密位置和速度伺服系统。

6.1　永磁直流伺服电动机的特性与参数

永磁直流伺服电动机的主要技术指标有额定电压、额定电流、额定转矩、额定转速、空载电流、空载始动电压、转矩常数、反电动势常数及机电时间常数等。有关特性与参数说明如下：

（1）转矩—转速特性曲线

永磁式直流伺服电动机的转矩—转速特性曲线如图 5.3-30 所示，借助 4 个基本参数来确定伺服电机的工作区。

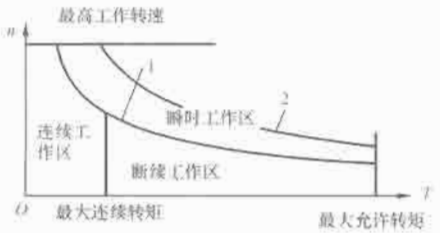


图 5.3-30　永磁式直流伺服电动机的转矩—转速特性曲线

1）最高工作转速。直流伺服电动机的最高工作转速主要是受换向器相邻两换向片间的最大容许电压的限制。有些永磁直流伺服电动机样本中提供的额定转速即指最高工作转速值。

2）最大连续转矩。电机在此转矩下能长期工作，它的大小受线圈允许温升的限制。有些样本中提供的额定转矩指的就是电机所能提供的最大连续转矩值。电机试验时，一般在 10～40r/min 转速下测量该值。

3）最大允许转矩或过载倍数。在最大允许转矩下，电机不能长期工作，只能作瞬时加速用。它主要受永磁体抗去磁能力的限制。

过载倍数指的是最大允许转矩与额定转矩之比，或是最大允许电流与额定电流之比。永磁式直流伺服电动机采用高矫顽力的稀土永磁材料作磁极时，过载能力大幅提高。

4）换向。电刷单位接触面上切换电流的大小受电刷和换向器单位接触面上的切换能量的限制。图 5.3-30 中曲线 1 范围内，电机基本上不产生火花；在曲线 2 范围内会产生火花。所以，电机在该范围内只允许瞬时运行，否则要损坏电刷和换向器，大大减少寿命。

永磁直流伺服电动机的上述 4 个基本参数把转矩—转速特性曲线划分为 3 个工作区。

在连续工作区内，电机可在转矩和转速的任意组合下长期工作。

在断续工作区，电机只能作间断工作，间断周期要根据载荷周期曲线求得。

在瞬时工作区，电机只允许瞬时过渡。在曲线 2 外不允许使用。

（2）转矩常数

转矩常数是单位电流产生的转矩。

（3）反电动势常数

反电动势常数是单位转速所感应的电动势值。电动机在发电机状态运行时，发电机的开路电压与转速之比，即为电动势常数。

(4) 电枢电感

一般来讲，电枢电感对永磁直流伺服电动机的机电时间常数影响并不明显。所以，电枢电感可用简化方法测得约值：电动机在转子堵转状态下，将50Hz的适当交流电压施加在电机电枢输入端，读取电压 U 和电流 I 值，求得电枢电抗 X 值为

$$X=\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2-R_a^2} \tag{5.3-44}$$

式中，R_a 为电枢电阻，Ω，则电枢电感 L_a（H）$=X/314$。

(5) 电气时间常数

电气时间常数 τ_e（s）是指电枢输入端施加电压后，电枢电流达到稳定值的63.2%时所需的时间。它由电枢电感 L_a 与电枢回路全电阻 R_m 之比求得，即

$$\tau_e=\frac{L_a}{R_m} \tag{5.3-45}$$

式中，R_m 为电枢回路全电阻，Ω，它包括电枢绕组电阻、电刷电阻和电刷与换向器的接触电阻等。

(6) 转动惯量

在制造厂，电动机的电枢转动惯量大多采用钢丝扭摆法测定，也可采用制动法来测得。将电动机驱动到额定转速后，切断电源，测取电动机从额定转速滑到半速时的时间 t_1，然后，在电动机轴上加一个已知转动惯量为 J_b 的负载，用同样方法测取从额定转速滑到半速时的时间 t_2，则电机的转动惯量（kg·m²）为

$$J_a=J_b\frac{t_1}{t_2-t_1} \tag{5.3-46}$$

(7) 机械时间常数

永磁直流伺服电动机电枢输入端施加阶跃电压，电动机从零速达到稳定转速的63.2%所需的时间即为电动机的机械时间常数（s），即

$$\tau_m=\frac{R_mJ_a}{K_EK_T} \tag{5.3-47}$$

(8) 黏性阻尼常数

永磁直流伺服电动机电枢转动时，风阻耗、摩擦损耗及换向时线圈的换向电流以及加速中的损耗等电气损耗都是电动机转速的函数，可用黏性阻尼常数 R_Ω 来表征。它可以用下列方法测得：电动机空载，施加电枢电压使达额定转速和1/2额定转速，分别读取两种转速下的电压和电流值，按下式分别计算出 R_Ω[N·m/(rad/s)]值，然后取其两者的平均值。

$$R_\Omega=\frac{(UI_a-I_a^2R_a)}{\Omega_r^2} \tag{5.3-48}$$

6.2 动态特性

为了满足自动控制系统快速响应的要求，当电压控制信号改变时，要求电动机的转速变化能迅速跟上控制信号的改变，就要求电动机的动态过程越短越好。永磁伺服直流电动机的动态过程是非常复杂的机电瞬变过程。在整个机电过渡过程中，电气过渡过程和机械过渡过程同时存在、两者交叠在一起，又相互影响。

永磁伺服直流电动机的动态方程如下

$$u=e+i_aR_a+L_a\frac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} \tag{5.3-49}$$

$$e=K_1\Omega \tag{5.3-50}$$

$$T_{em}=T_L+R_\Omega\Omega+J_a\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t} \tag{5.3-51}$$

$$T_{em}=K_1i_a \tag{5.3-52}$$

式中，u 为动态过程中电压，V；i_a 为动态过程中电流，A；e 为动态过程中感应电动势，V；T_{em} 为电磁转矩的瞬时值，N·m；T_L 为负载转矩，N·m，包括电动机轴上输出转矩和恒定阻力转矩；Ω 为电枢机械角速度，rad/s。

对式（5.3-49）～式（5.3-52）进行拉普拉斯变换，并令全部初始条件为零，整理可得

$$U(s)-E(s)=(L_as+R_a)I_a(s) \tag{5.3-53}$$

$$E(s)=K_1\Omega(s) \tag{5.3-54}$$

$$T_{em}(s)-T_L(s)=(J_as+R_\Omega)\Omega(s) \tag{5.3-55}$$

$$T_{em}(s)=K_1I_a(s) \tag{5.3-56}$$

以外施电压 $U(s)$ 和负载转矩 $T_L(s)$ 为输入量，以角速度 $\Omega(s)$ 为输出量，由式（5.3-53）～式（5.3-56）可作出永磁直流电动机的动态方程框图，如图5.3-31所示。由图可见，永磁直流电动机本身是一个闭环系统，感应电动势引入了与电动机角速度成正比的负反馈信号，增加了系统的有效阻尼。

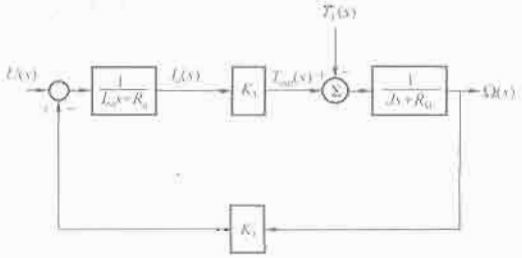


图5.3-31 永磁直流电动机的动态方程框图

6.3 设计特点

1）为了改善起动性能，降低转矩脉动，一般在电枢上斜一个槽距。

2）为了减小转子的转动惯量，降低机电时间常数，应选用细长的电枢。

3）为了降低转矩波动，采用较普通直流电动机更多的电枢槽数、换向片数。

4）为了使伺服电动机正、反转时特性对称，电刷应放在几何中性线上。

7 永磁直流力矩电动机

永磁直流力矩电动机是一种能够长期处于低速或堵转状态下工作的低转速、大转矩的直流电动机。采用直流力矩电动机的直接驱动系统比传统的齿轮传动系统结构大大简化，摩擦阻力和附加损耗减小，直接传动消除了齿隙，减小了传动误差，提高了系统传动精度。与其他伺服系统的执行组件相比较，永磁直流力矩电动机具有以下明显优点：

(1) 速度和位置控制精度高

系统速度和位置的控制精度即速度和位置的分辨率。永磁直流力矩电动机直接驱动的伺服系统消除了采用齿轮传动时所带来的齿隙“死区”和材料弹性变形所引起的误差，因此它既可使系统的放大倍数做得很高，又能保持系统的稳定，从而使系统的速度和位置的控制精度都有较大的提高。

(2) 良好的特性线性度

永磁直流力矩电动机的转矩—电流特性具有很高的线性度。这为系统的灵活控制和平稳运行创造了条件。

(3) 使用性好

采用永磁直流力矩电动机的直接驱动系统，还具有运行可靠，维护简便，振动小，机械噪声低和结构紧凑等优点。

由于采用永磁直流力矩电动机直接驱动的伺服系统具有

上述特点，它便获得了很好的静态和动态性能，尤其在无爬行的平稳低速运行方面更为突出，这是齿轮传动或液压传动系统所无法比拟的。

7.1　工作原理及结构

永磁直流力矩电动机和一般永磁直流电动机的工作原理基本相同，只是它经过特殊设计后具有低的转速和足够大的转矩以及当转子处于任意角度和速度时具有较小的转矩波动。此外，还具有运行效率高、无励磁损耗以及调速性能好等诸多特点。

永磁直流力矩电动机通常做成扁平结构，电枢长度与直径之比一般仅为0.2左右，并选取较多的极对数。选用扁平结构是为了使力矩电动机在一定的电枢体积和电枢电压下能产生较大的转矩和较低的转速。

永磁式直流力矩电动机结构型式分为分装式和内装式（组装式）两种。分装式电动机结构包括定子、电枢和刷架组件三大部件。分装式电动机电枢直接套在负载轴上，机壳按系统安装需要设计。内装式电动机与一般电动机的结构相同，机壳和轴在产品交付时已装配好。

图5.3-32为永磁式直流力矩电动机的结构示意图。图中定子是用10号钢制成的带槽的圆环，槽中镶嵌铝镍钴、钕铁硼或铁氧体等永久永磁体。

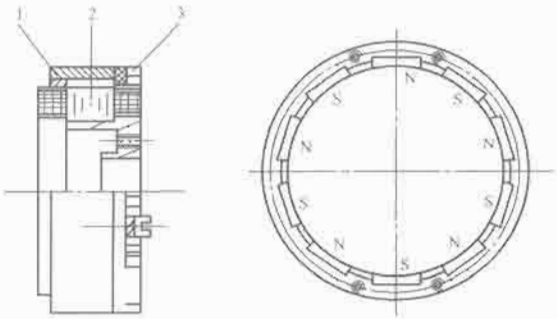


图5.3-32　永磁直流力矩电动机结构示意图
1—定子；2—电枢；3—刷架组件

电枢铁心通常是用冷轧硅钢片叠成，并压入非导磁材料金属支架。电枢绕组一般采用波绕组。槽楔是由铜板材料制成，兼作换向片。槽楔伸出电枢槽外两端，一端作电枢绕组接线用；另一端做成梯形，排列成环形换向器，最后用高温环氧树脂灌封成整体。

7.2　技术指标

永磁直流力矩电动机的工作原理与普通永磁直流电动机的相同，但由于永磁直流力矩电动机经常使用在低速和堵转状态，在设计上提出了一些不同于一般永磁直流电动机的特殊参数，来表征这类电机的特性。

1）连续堵转电流。在规定条件下，永磁直流力矩电动机允许连续堵转又不引起过热的最大电流。

2）连续堵转转矩。在规定条件下，对永磁直流力矩电动机施加连续堵转电流，电动机连续堵转时产生的输出转矩。

3）连续堵转转矩灵敏度。连续堵转转矩灵敏度指电动机输入单位电流时所产生的转矩，在一般直流电动机中称为转矩常数。

4）峰值堵转电流。在规定条件下，永磁直流力矩电动机不至于引起堵转电动机损坏或性能不可恢复的最大电流。

5）峰值堵转转矩。在规定条件下，对永磁直流力矩电动机施加峰值堵转电流，电动机连续堵转时产生的输出转矩。

6）最大空载转速。永磁直流力矩电动机空载时施加峰值堵转电压所达到的稳定转速。

7）峰值堵转控制功率。永磁直流力矩电动机产生峰值堵转转矩时的控制功率。

8）连续堵转控制功率。永磁直流力矩电动机产生连续堵转转矩时的控制功率。

9）峰值堵转电压。永磁直流力矩电动机产生峰值堵转转矩时的电枢电压。

10）连续堵转电压。永磁直流力矩电动机产生连续堵转转矩时的电枢电压。

7.3　设计要点

（1）降低转矩波动

由于直接驱动系统工作转速较低，电动机系统本身存在的转矩波动直接作用于负载，对系统的稳定性和控制精度影响明显。在高精度控制系统中，如果永磁直流力矩电动机转矩波动不能得到有效控制，转矩波动产生的影响对系统将十分明显。当永磁直流力矩电动机工作在高速区时，转矩波动尚能被转子惯量吸收；但工作在低速区时，转矩波动会严重影响伺服系统的速度稳定性、位置精度，有时甚至使系统无法正常工作。这就要求永磁直流力矩电动机在低速时的转矩波动不能过大，必须控制在允许范围内。

（2）转矩—电流特性线性度保证

为了使永磁直流力矩电动机的转矩正比于输入电流，并与电动机的转速、转角无关。通常，电动机的磁路设计为高饱和状态，从而保证了电动机具有良好的线性调节特性。

（3）电气时间常数的降低

对于采用电动机的直接驱动伺服系统来说，尽管电动机的电枢直径较普通直流伺服电动机的大，但由于它运行在低速状态，又有较大的堵转转矩，因此，系统的机械时间常数大大减小。这样电动机的电气时间常数的影响就相对较大，是需要重点加以考虑的。为了全面提高系统的动态性能，必须设法减小电动机的电气时间常数。所以，永磁直流力矩电动机常采用多极结构，极对数越多，电枢电感也就越小，有利于减小电气时间常数。同时，适当增大电动机气隙，也有利于减小电枢反应磁链，相应地使电动机的电气时间常数减小。

（4）换向器结构工艺与槽满率

由于永磁直流力矩电动机结构的特殊性，在其电枢中，槽楔兼作换向器，若槽满率过高，下线困难，成品合格率低；若槽满率过低，则槽楔圆周方向固定困难。总之，槽满率过高或过低均造成电枢加工的效率低下、成品率低、成本上升，因此，设计时应选择合适的换向器结构工艺与槽满率。

为了防止换向部分氧化而引起电刷接触不良，换向器的表面处理采用镀铑、铑、金等惰性元素防护。

（5）电刷组件

电刷组件是直流力矩电动机的重要部件之一，为引导电枢电流而设置。要选用合适的电刷，弹簧片的热处理和电刷与弹簧片的连接工艺也很重要。

（6）电枢制造

随着科技进步和各种新材料、新技术的出现，进一步减小电动机体积成为可能，因而各类控制系统对直流力矩电动机在减小体积方面的要求也随之越来越高。为达此目的直流力矩电动机除要尽最大可能减小电枢铁心长度外，突出的问题是容许的电枢绕组端部长度要求越来越小，这是在电枢制造方面需要加以解决的问题。

8 试验及相关标准

目前，伺服类永磁直流电动机相关标准较完善，一般用途的永磁直流电动机可参照小功率电机标准，较大功率电机可参照中小型直流电机标准。下面列举了部分相关标准供设计、使用、试验时参考：

GB/T 1311—1989《直流电机试验方法》

GB/T 7345—1994《控制微电机基本技术要求》

GB/T 14817—1993《永磁直流伺服电动机通用技术条件》

GB/T 10401—1988《永磁直流力矩电动机通用技术条件》

GB/T 14818—1993《线绕盘式直流伺服电动机技术条件》

JB/T 5867—2004《印制绕组直流伺服电动机通用技术条件》

9 选型和使用

9.1 选用原则

永磁直流电动机的电压选择主要取决于电源情况，一般来说，有电池电源、整流电源、发电机电源等，选定电源后，再根据电源的电压来选用合适电压等级的电动机。

永磁直流电动机功率确定的主要依据是负载的大小，根据负载的转矩、转速计算出电动机的功率，再选用合适的电动机。

对于短时工作或周期性工作负载，选用电动机的功率可比负载功率小些。应依据电机的发热计算其等效平均功率，再按平均功率选用相应功率等级的电动机。

由于永磁直流电动机所用永磁体对温度的敏感性，尤其是高温情况会出现可逆与不可逆去磁，所以对于使用环境温度特殊的场合，在订货时对供货厂家明确要求，以便其推荐合适的电动机。

选用时还应考虑电机的防护等级，是否在特殊的气候环境工作，如潮湿、盐雾、高原低气压、潜水、淋雨等。

永磁直流伺服电动机选型还可见表 5.3-2。

表 5.3-2 永磁直流伺服电动机性能比较

特 性	普通电枢型	盘式绕组型	线绕空心杯
转动惯量	中	小	很小
机电时间常数	中	很小	很小
高速性能	好	差	中
低速性能	中	很好	好
固有阻尼损耗	中	大	小
热时间常数	大	小	小
转矩惯量比	中	高	很高
相对成本	低	中	中
轴向尺寸	长	短	中

永磁直流力矩电动机还应从下述几个方面考虑选型：

1）空载运行，电动机带动负载空载运行时，在整个调速范围内，折算到电动机转轴上的转矩应小于电动机连续额定转矩。

2）低速运行或重负载时，应根据给定的电动机载荷—工作周期曲线，依据最大转矩过载倍数选取。

3）动态转矩平衡：在动态过程中，电动机工作于瞬时工作区，应根据要求求出加速转矩，峰值转矩应大于加速转矩。

4）工作于频繁起制动或负载经常变化的电动机，应根据等效发热原则，使转矩的方均根值小于电动机的额定转矩。

9.2 应用举例

永磁直流电动机使用量最大的当属三槽（或少槽）永磁直流电动机，如剃须刀、微型风扇、玩具电机、光盘托盘等。特点是低压、小功率、短时工作。

手机、BP机则大量使用了微型空心杯永磁直流电动机作为振动电机。

烟草机械、焊接机械等工业机械的动作执行电动机则较多选用了印制绕组永磁直流电动机，充分发挥了其惯量小、响应快的特点。

早期的电动自行车普遍选用了印制绕组永磁直流电动机，主要是利用了其扁平结构的特点。

工业机器人电机则多选用线绕盘式永磁直流伺服电动机或其他永磁直流伺服电动机。

高压开关、电动阀门等工业设备的驱动也有许多采用了永磁直流电动机。

军事用途的火炮、雷达、导弹电动舵机等伺服系统普遍采用永磁直流伺服电动机作为执行电机。

高尔夫球车、小型玩具汽车、电瓶车等也多用永磁直流电动机作驱动电动机。

汽车行业应是永磁直流电动机最大的用户，每台汽车使用了多达几十台永磁直流电动机，如雨刮电机、座椅电机、起动电机、ABS防抱死电机、泵电机、摇窗电机等。

10 典型产品数据

国内厂家的部分典型产品技术数据见表 5.3-3～表 5.3-6。

表 5.3-3 ZYN 系列永磁直流电动机

型号	额定功率(kW)	额定电压(V)	额定转速(r/min)	额定电流(A)	效率(%)	重量(kg)
ZYN-90-1	1.1	160	3000	8.38	82.0	27
ZYN-90-2	1.5	160	3000	11.1	84.7	35
ZYN-100-1	2.2	160	3000	16.4	84	38
ZYT-100-3	4.0	400	2700	11.5	87.3	56
ZYN-112-1	3	160	1500	22.3	84.0	70
ZYN-112-2	7	400	2700	21.6	81.2	79
ZYN-132-1	18.5	400	2700	51.1	90.5	132
ZYN-132-3	27	400	2700	73.0	92.5	176
ZYN-160-11	33	400	2700	90.9	90.8	202
ZYN-160-31	49.5	400	2700	134	92.4	266
ZYN-180-11	33	400	1350	90.5	91.2	310
ZYN-200-21	67	400	1350	180	92.1	515
ZYN-225-11	110	440	1500	265	94.2	671
ZYN-250-41	220	400	1350	527	94.0	1170

表 5.3-4 ZYT 系列永磁直流电动机

型号	额定功率(W)	额定电压(V)	额定转速(r/min)	额定电流(A)	额定转矩($\times10^{-3}$N·m)	允许瞬逆转速差(r/min)
55ZYT01	20	24	3000	1.5	63.7	200
55ZYT104	20	110	3000	0.34	63.7	200
70ZYT01	50	24	3000	3.2	159.2	200
70ZYT05	85	24	6000	5.2	135.4	300
80ZYT54	90	220	3000	0.7	286.7	200
90ZYT01	92	110	1500	1.2	588	100
90ZYT05	165	24	3000	9.5	525.7	200
90ZYT08	100	220	2000	0.7	478	200
100ZYT01	230	220	1500	1.5	1470	100
100ZYT07	150	24	1000	9.0	1464	100
110ZYT01	245	110	1500	3.0	1560	100
110ZYT05	400	24	3000	22.5	1274	200
130ZYT01	600	110	1500	7.2	3824	100
130ZYT09/H1	800	24	2500	48	3059	150

表 5.3-5 稀土永磁直流伺服电动机

机座号	额定功率 (kW)	额定转矩 (N·m)	额定转速 (r/min)	额定电压 (V)	额定电流 (A)	峰值转矩 (N·m)	电枢电阻 (75℃)(Ω)	电枢电感 ($\times10^{-3}$H)	转动惯量 ($\times10^{-6}$kg·m^2)	机电时间常数($\times10^{-4}$s)	重量 (kg)
70SZD01	0.1	1.00	1000	30	4.5	8	1.7	3.7	292	9.2	2
70SZD04	0.1	0.33	3000	90	1.5	3	0.7	1.1	146	11.0	1.5
70SZD08	0.25	0.83	3000	30	11	7	0.2	1.0	292	9.1	2
85SZD01	0.15	1.50	1000	90	2.2	12	8.3	33.6	564	11.8	4
85SZD03	0.25	1.67	1500	90	3.7	14	3.0	10.8	806	12.4	5
85SZD07	0.4	1.33	3000	180	2.8	11	1.1	5.4	564	11.4	4
105SZD02	0.55	5.5	1000	180	3.8	44	4.9	38.0	3277	13.6	9
105SZD04	0.8	8.0	1000	180	5.5	64	2.6	25.4	4915	14.8	11
105SZD07	1.1	7.5	1500	180	7.5	51	1.1	9.9	4915	14.7	11
105SZD12	2.2	7.3	3000	180	15	51	0.4	3.6	4915	14.9	11
130SZD01	1.1	11.0	1000	90	15	88	1.8	24.4	10486	21.3	14
130SZD04	2.2	22.0	1000	180	15	170	0.7	12.2	20972	23.9	20
130SZD09	3	10.0	3000	180	20	80	0.2	3.4	10486	22.8	14
175SZD01	3	30.0	1000	180	20.0	150	0.4	17.0	39858	21.9	45
175SZD03	4.5	30.0	1500	320	17	150	0.8	30.5	39858	44.6	45
175SZD04	4.5	22.5	2000	400	13.5	180	0.1	8.0	20972	27.2	20
175SZD11	7.5	37.5	2000	400	22.5	190	0.4	17.2	39858	47.2	45
175SZD15	10	33.3	3000	400	29.5	165	0.2	7.6	39858	48.8	45

表 5.3-6 永磁直流力矩电动机性能数据

型号	峰值堵转			连续堵转			最大空载转速 (r/min)	电枢电阻 (Ω)	电枢电感 ($\times10^{-3}$H)	转动惯量 (kg·m^2)	重量 (kg)	基本外形尺寸 (外径×内径×轴向长) (mm)
	电压 (V)	电流 (A)	转矩 (N·m)	电压 (V)	电流 (A)	转矩 (N·m)						
J28LY002	24	1.5	0.025	—	—	—	6000	20.5	4.2	—	0.04	ϕ28.6×ϕ5×14
J45LYX01-Z	12	4.5	0.15	3.3	1.3	0.045	3000	2.8	1.05	—	0.31	ϕ48×轴伸 ϕ5×34.5
J75LYX01	27	2.5	1	13.5	1.25	0.5	550	10	6.5	—	0.44	ϕ75×ϕ30×26
J90LYX01	24	1.2	0.9	19	0.95	0.7	230	19.5	15.5	—	0.65	ϕ90×ϕ15.5×30
J115LYX01	31	5.8	3	7.8	1.45	0.75	500	5.6	3.2	0.0013	0.73	ϕ115×ϕ38×25
J160LYX02	27	4.8	6.5	12	2.1	3.0	150	5.15		0.010	3.3	ϕ160×ϕ80×45
J200LYX01	60	10	12.5	17	2.8	3.5	400	6	6.2	0.018	3	ϕ200×ϕ96×35
J235LYX01	30	10.5	16	12	4.2	6.4	150	2.94	3.5	0.018	2.8	ϕ235×ϕ159×32
J250LYX10	60	9.0	90	40	6.0	60	50	6.3	21	0.174	—	ϕ250×ϕ85×132
J255LYX02	48	7.5	23	24	3.75	11.5	110	6.4	9.4	—	4.4	ϕ275×ϕ168×45
J300LYX03	60	7.0	45	35	4.0	25	70	8.35	18.6	0.127	11	ϕ300×ϕ198×50
J370LYX02	95	12.3	80	35.5	4.6	30	120	7.2	—	0.38	17.2	ϕ370×ϕ74×64
J510LYX08	60	14	340	40	9.4	228	22	4.34	20	2.14	50	ϕ510×ϕ360×120
J600LYX03	110	18.5	380	44	7.4	152	40	6.1	18.6	2.60	49.5	ϕ610×ϕ460×120
J750LYX06	110	98	900	55	49	450	100	—	—	—	—	ϕ750×ϕ530×150
J850LYX05	80	28.5	960	36	17	575	16	2	13	20	178	ϕ920×ϕ630×135
J1100LYX25	220	158	20000	55	40	5000	13	—	—	—	—	ϕ1100×ϕ700×350

第4章 永磁同步电动机

1 概述

永磁同步电动机的运行原理与电励磁同步电动机的相同，但它以永磁体提供的磁通替代后者的励磁绕组励磁，使电动机结构较为简单，降低了加工和装配费用；且省去了容易出问题的集电环和电刷，提高了电动机运行的可靠性；又因无需励磁电流，省去了励磁损耗，提高了电动机的效率和功率密度。因而它是近年来研究较多并在各个领域得到越来越广泛应用的一种电动机。

永磁同步电动机分类方法比较多，按工作主磁场方向的不同，可分为径向磁场式、轴向磁场式（盘式）和横向磁场式。按电枢绕组位置的不同，可分为内转子式（常规式）和外转子式。按转子上有无起动绕组，可分为无起动绕组的电动机（用于变频器供电的场合，利用频率的逐步升高而起动，并随着频率的改变而调节转速，常称为调速永磁同步电动机）和有起动绕组的电动机（既可用于调速运行，又可在某一频率和电压下利用起动绕组所产生的异步转矩起动，常称为异步起动永磁同步电动机）。按供电电流波形的不同，可分为矩形波永磁同步电动机和正弦波永磁同步电动机。异步起动永磁同步电动机用于频率可调的传动系统时，形成一台具有阻尼（起动）绕组的调速永磁同步电动机。

2 结构

2.1 总体结构

永磁同步电动机由定子、转子和端盖等部件构成（见图5.4-1）。定子与普通感应电动机基本相同，也采用叠片结构，这样可以减小电动机运行时的铁损耗。转子铁心可以做成实心的，也可以用叠片叠压而成。电枢绕组既有采用集中整距绕组的，也有采用分布短距绕组和非常规绕组的。一般来说，矩形波永磁同步电动机通常采用集中整距绕组，而正弦波永磁同步电动机更常采用分布短距绕组。在一些正弦波电流控制永磁同步电动机中，为了减少绕组产生的磁动势空间谐波，使之更接近正弦分布以提高电动机的有关性能，采用了一些非常规绕组，如采用图5.4-2所示的正弦绕组，可大大减小电动机转矩纹波，提高电动机运行平稳性。为减小电动机杂散损耗，定子绕组通常采用星形联结。永磁同步电动机的气隙长度是一个非常关键的尺寸，尽管它对这类电动机的无功电流的影响不如对感应电动机那么敏感，但是它对电动机的交、直轴电抗影响很大，进而影响到电动机的其他性能。此外，气隙长度的大小还对电动机的装配工艺和电动机的杂散损耗有着较大的影响。

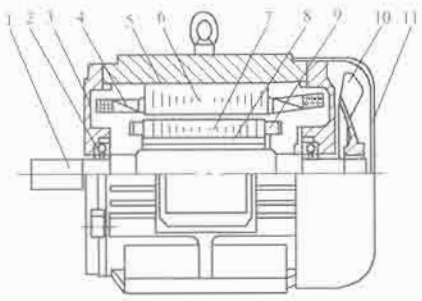


图5.4-1 永磁同步电动机结构示意图
1—转轴；2—轴承；3—端盖；4—定子绕组；5—机座；6 定子铁心；7 转子铁心；8 永磁体；9—起动笼；10—风扇；11—风罩

2.2 转子磁极结构

转子磁极结构是永磁同步电动机与其他电机的最主要区别，转子磁极结构不同，则电动机的运行性能、控制系统、制造工艺和适用场合也不同。

按照永磁体在转子上位置的不同，永磁同步电动机的转子磁极结构一般可分为表面式、内置式和爪极式。同时还存在其他一些特殊的磁极结构型式，如聚磁型永磁体结构型式，详见本章第8.6.2节。

2.2.1 表面式转子磁极结构

这种结构中，永磁体通常呈瓦片形，并位于转子铁心的外表面上，永磁体提供磁通的方向为径向，且永磁体外表面与定子铁心内圆之间一般仅套以起保护作用的非磁性圆筒，或在永磁磁极表面包以无纬玻璃丝带作保护层。图5.4-3中的转子即为这种结构的典型代表。有的调速永磁同步电动机的永磁磁极用许多矩形小条拼成瓦片形，用以降低电动机的制造成本。

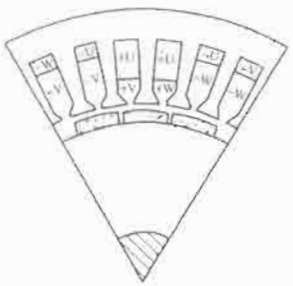


图5.4-2 非常规分布的永磁同步电动机绕组

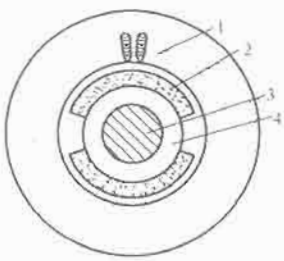


图5.4-3 表面式永磁同步电动机横截面图
1—定子；2—永磁体；3—转轴；4—转子铁心

表面式转子磁极结构又分为凸出式［见图5.4-4（a）］和插入式［见图5.4-4（b）］两种，对采用稀土永磁的电动机来说，由于永磁材料的相对回复磁导率接近1，所以表面凸出式转子在电磁性能上属于隐极转子结构；而表面插入式转子的相邻两个永磁磁极间有着磁导率很大的铁磁材料，故在电磁性能上属于凸极转子结构。

（1）表面凸出式转子结构

由于其具有结构简单、制造成本较低、转动惯量小等优点，在矩形波永磁同步电动机和恒功率运行范围不宽的正弦波永磁同步电动机中得到了广泛应用。此外，表面凸出式转

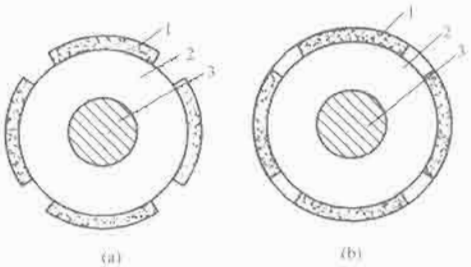


图 5.4-4　表面式转子磁极结构
（a）凸出式；（b）插入式
1—永磁体；2—转子铁心；3—转轴

子结构中的永磁磁极易于实现最优设计，使之成为能使电动机气隙磁通密度波形趋近于正弦波的磁极形状，可显著提高电动机乃至整个传动系统的性能。

（2）表面插入式转子结构

这种结构可充分利用转子磁路的不对称性所产生的磁阻转矩，提高电动机的功率密度，动态性能较凸出式有所改善，常被某些调速永磁同步电动机所采用。但漏磁因数和制造成本都较凸出式的大。

总之，表面式转子磁极结构的制造工艺简单、成本低，应用较为广泛。但因转子表面无法安放起动绕组，无异步起动能力，不能用于异步起动永磁同步电动机。

2.2.2　内置式转子磁极结构

这类结构的永磁体位于转子内部，永磁体外表面与转子铁心外圆之间（对外转子结构则为永磁体内表面与转子铁心内圆之间）的铁心构成了极靴，极靴中可以放置笼型绕组，起阻尼和起动作用，动、稳态性能好，广泛用于要求有异步起动能力或动态性能高的永磁同步电动机。内置式转子内的永磁体受到极靴的保护，其转子磁路结构的不对称所产生的磁阻转矩也有助于提高电动机的过载能力和功率密度，而且易于"弱磁"扩速。

按永磁体磁化方向与转子旋转方向的相互关系，内置式转子磁极结构又可分为径向式、切向式和混合式三种。

（1）径向式结构

这类结构（见图 5.4-5）的优点是漏磁因数小、转轴上不需采取隔磁措施、极弧因数易于控制、转子冲片机械强度高、安装永磁体后转子不易变形等。图 5.4-5（a）是早期采用的转子磁极结构，现已很少采用。图 5.4-5（b）、（c）和（e）中，永磁体轴向插入永磁体槽并通过隔磁磁桥限制漏磁通，结构简单，运行可靠，转子机械强度高，因而近年来应用广泛。图 5.4-5（c）比（b）提供了更大的永磁体空间。图 5.4-5（d）属于外转子结构，它也属于内置径向式的磁极结构。

（2）切向式结构

这类结构（见图 5.4-6）的漏磁因数较大。为减少永磁体向里侧的漏磁，在永磁体里侧需采用相应的隔磁措施，如图 5.4-6（a）所示的隔磁铜套、图 5.4-6（b）所示的空气隔磁槽或非磁性转轴，制造工艺较复杂，制造成本较径向式结构有所增加。其优点在于每极磁通由相邻两个磁极并联提供，可获得更高的气隙磁通密度。尤其当电动机极数较多、径向式结构不能提供足够的每极磁通时，这种结构的优势便显得更为突出。此外，采用切向式转子结构的永磁同步电动机的磁阻转矩在电动机总电磁转矩的比例可达 40%，这对充分利用磁阻转矩，提高电动机的功率密度和扩展电动机的恒功率运行范围都是很有利的。

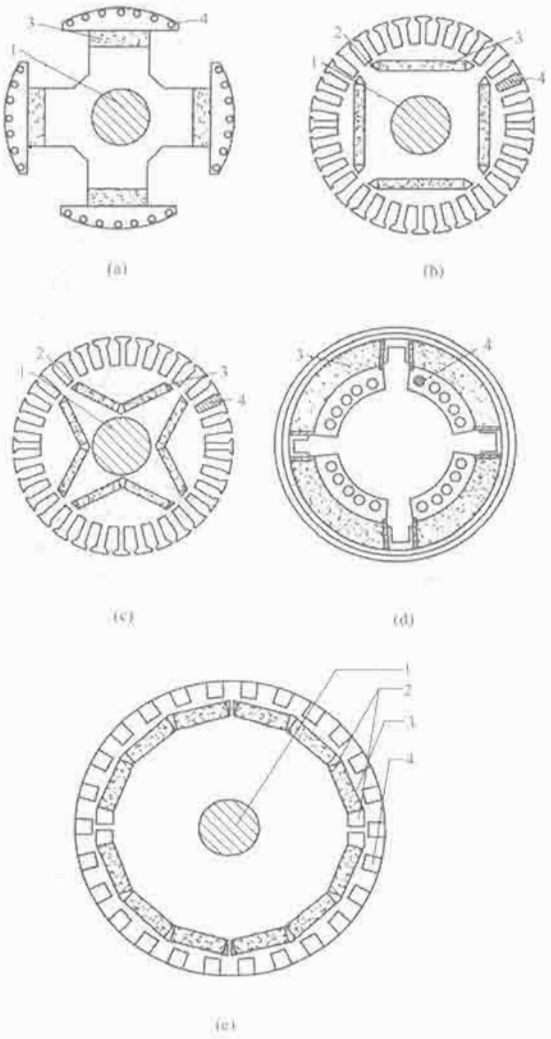


图 5.4-5　内置径向式转子磁极结构
1—转轴；2—永磁体槽；3—永磁体；4—转子导条

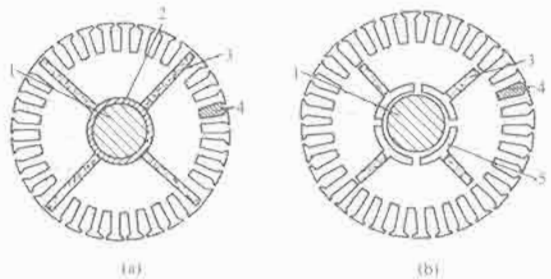


图 5.4-6　内置切向式转子磁极结构
1—转轴；2—隔磁铜套；3—永磁体；
4—转子导条；5—空气隔磁槽

（3）混合式结构

这类结构（见图 5.4-7）集中了径向式和切向式转子结构的优点，可以提高气隙磁通密度，但其结构和制造工艺较为复杂，制造成本也比较高。图 5.4-7（a）的混合式转子磁路结构，需采用非磁性转轴或采用隔磁铜套，主要应用于采用剩磁密度较低的铁氧体永磁的永磁同步电动机。如图 5.4-7（b）、（c）和（d）所示结构近年来应用得较多，永磁体里侧不需采取隔磁措施。需要指出的是，图 5.4-7（b）结构的径向部分永磁体磁化方向长度约是切向部分永磁体磁化方向

长度的一半。图5.4-7（c）和（d）永磁体的径向部分与切向部分的磁化方向长度相等。在图5.4-5（b）和（c）、图5.4-7（c）和（d）这四种结构中，转子依次可为安放永磁体提供更多的空间，空载漏磁因数也依次减小，制造工艺却依次更复杂，转子冲片的机械强度也依次有所下降。

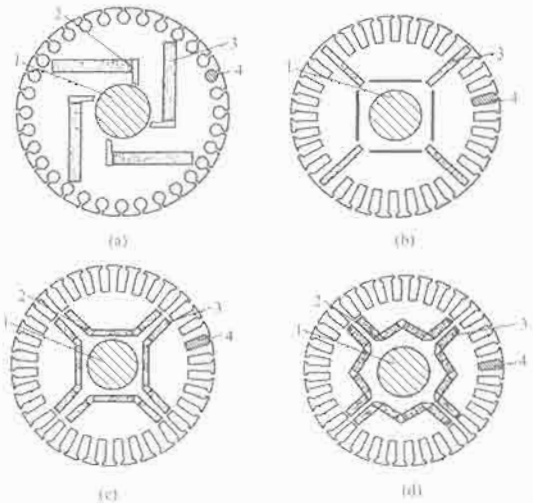


图5.4-7 内置混合式转子磁极结构
1—转轴；2—空气隔磁槽；3—永磁体；4—转子导条

在选择转子磁极结构时还应考虑到不同转子磁极结构电机的交、直轴同步电抗，X_q、X_d及其比例X_q/X_d（称为凸极率）也不同。在相同条件下，上述三类内置式转子磁极结构电动机直轴同步电抗X_d相差不大，但它们的交轴同步电抗X_q却相差较大。切向式转子磁极结构电动机X_q最大，径向式转子磁极结构电动机的X_q次之。由于磁极结构和尺寸的多种多样，X_d、X_q的大小需要根据所选定的结构和具体尺寸运用电磁场数值计算求得。较大的X_q和凸极率可以提高电动机的牵入同步能力、磁阻转矩和电动机的过载倍数，因此设计高过载倍数的电动机时，应充分利用大的凸极率所产生的磁阻转矩。

2.2.3 爪极式转子磁极结构

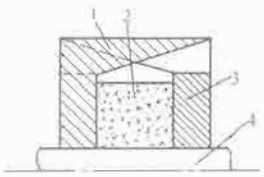


图5.4-8 爪极式转子磁极结构
1—左法兰盘；2—圆环形永磁体；3—右法兰盘；4—非磁性转轴

爪极式转子磁极结构通常由两个带爪的法兰盘和一个圆环形的永磁体构成，图5.4-8为其结构示意图。左右法兰盘的爪数相同，且两者的爪极相互错开，沿圆周均匀分布，永磁体轴向充磁，因而左右法兰盘的爪极分别形成极性相异、相互错开的永磁同步电动机的磁极。爪极式转子磁极结构永磁同步电动机的性能较低，又不具备异步起动能力，但结构和工艺较为简单。详细结构见第11节。

2.3 隔磁措施

如前所述，为不使电动机中永磁体的漏磁因数过大而导致永磁体利用率降低，应注意各种转子结构的隔磁措施。图5.4-9中标注尺寸b的冲片部位称为隔磁磁桥，通过磁桥部位磁通达到饱和来起限制漏磁的作用。隔磁磁桥宽度b越小，该部位的磁阻便越大，越能限制漏磁通。但是b过小将使冲片机械强度变差，并缩短冲模的使用寿命。

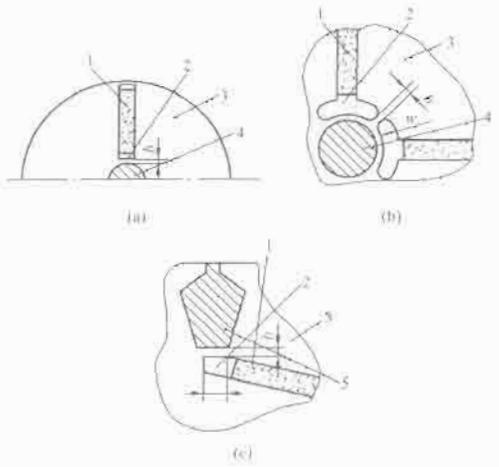


图5.4-9 几种典型的隔磁措施
1—永磁体；2—永磁体槽；3—转子铁心；4—转轴；5—转子导条

隔磁磁桥长度w也是一个关键尺寸，计算结果表明，如果隔磁磁桥的长度不能保证一定的尺寸，即使磁桥宽度小，磁桥的隔磁效果也将明显下降。但w达到一定尺寸后，再增加w，隔磁效果不再有明显的变化，而过大的w将使转子的机械强度下降，制造成本提高。

切向式转子结构的隔磁措施一般采用非磁性转轴或在转轴上加隔磁铜套［见图5.4-6（a）］，这使得电动机的制造成本增加，制造工艺变得复杂。近年来，有些单位研制了采用空气隔磁的新技术［见图5.4-6（b）］，取得了一定的效果。但是，当电动机容量较大时，这种结构使得转子的机械强度显得不足，电动机可靠性下降。

3 稳态性能

3.1 稳态运行方程和相量图

正弦波永磁同步电动机稳态运行于同步转速时，根据双反应理论可写出电压方程。

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{E}_0 + \dot{I}_1 R_1 + \mathrm{j}\dot{I}_1 X_1 + \mathrm{j}\dot{I}_d X_{ad} + \mathrm{j}\dot{I}_q X_{aq} \\ &= \dot{E}_0 + \dot{I}_1 R_1 + \mathrm{j}\dot{I}_d X_d + \mathrm{j}\dot{I}_q X_q \end{aligned} \tag{5.4-1}$$

式中，$\dot{E}_0$为永磁气隙基波磁场所产生的每相空载反电动势有效值，V；$\dot{U}$为外施相电压有效值，V；$\dot{I}_1$为定子相电流有效值，A；R_1为定子绕组相电阻，Ω；X_{ad}、X_{aq}为直、交轴电枢反应电抗，Ω；X_1为定子漏抗，Ω；X_d、X_q为直、交轴同步电抗，Ω；$X_d = X_{ad} + X_1$，$X_q = X_{aq} + X_1$；$\dot{I}_d$、$\dot{I}_q$为直、交轴电枢电流有效值，A，$I_d = I_1 \sin\psi$，$I_q = I_1 \cos\psi$，ψ为$\dot{I}_1$和$\dot{E}_0$之间的夹角（°），称为内功率因数角，$\dot{I}_1$超前$\dot{E}_0$时为正。

由电压方程可画出永磁同步电动机在不同工况下稳定运行时的几种典型相量图，如图5.4-10所示。图中，$\dot{E}_\delta$为气隙合成基波磁场所产生的电动势，称为气隙合成电动势，V；$\dot{E}_d$为气隙合成基波磁场直轴分量所产生的电动势，称为直轴内电动势，V；θ为$\dot{U}$超前$\dot{E}_0$的角度，即功率角，也称转矩角；φ为电压$\dot{U}$超前定子相电流I_1的角度，即功率因数角。图5.4-10（a）、（b）和（c）中的电流I_1均超前于空载反电动势$\dot{E}_0$。直轴电枢反应均为去磁性质，导致电动机直轴内电动势$\dot{E}_d$小于空载反电动势$\dot{E}_0$。图5.4-10（e）

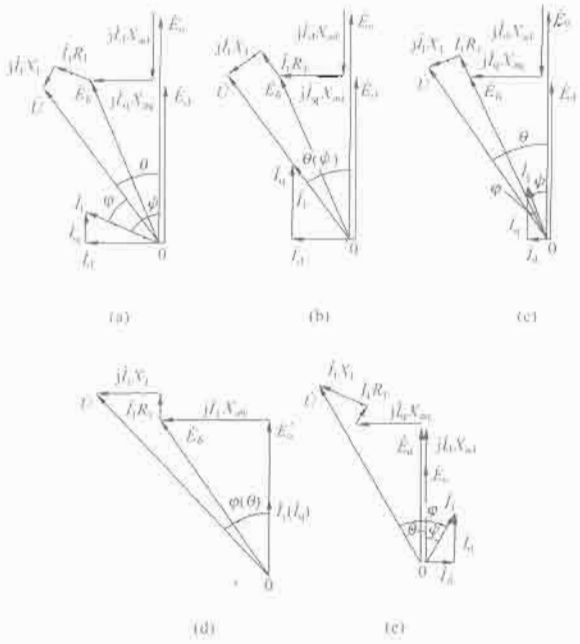


图 5.4-10　永磁同步电动机几种典型相量图

中的电流 I_1 滞后于 $\dot{E}_0$，此时直轴电枢反应为增磁性质，导致直轴内电动势 $\dot{E}_{0}$ 大于 $\dot{E}_0$。如图 5.4-10（d）所示为直轴增、去磁临界状态（$\dot{I}_1$ 与 $\dot{E}'_0$ 同相）下的相量图，由此可列出如下电压方程

$$\begin{aligned} U\cos\theta &= E'_0 + I_1 R_1 \\ U\sin\theta &= I_1 X_q \end{aligned} \tag{5.4-2}$$

从而可以求得直轴增、去磁临界状态时的反电动势

$$E'_0 = \sqrt{U^2 - (I_1 X_q)^2} - I_1 R_1 \tag{5.4-3}$$

式（5.4-3）可用于判断所设计的电动机是运行于增磁状态还是运行于去磁状态。实际 E_0 值由永磁体产生的空载气隙磁通算出，比较实际 E_0 与 E'_0，若 E_0 大于 E'_0，电动机将运行于去磁状态；反之，将运行于增磁工作状态。从图 5.4-10还可看出，要使电动机运行于单位功率因数［见图 5.4-10（b）］或容性功率因数状态［见图 5.4-10（a）］，只有设计在去磁状态时才能达到。

需要指出的是，由于内置式永磁同步电动机转子直轴磁路中永磁体的磁导率很小（对稀土永磁来说其相对回复磁导率近似为 1），使得电动机直轴电枢反应电抗一般小于交轴电枢反应电抗，分析时应注意其异于电励磁凸极同步电动机的这一特点。

3.2　稳态运行性能

3.2.1　电磁转矩和矩角特性

根据图 5.4-10 可以推导出电动机的输入功率为

$$P_1 = mUI_1\cos\varphi = mUI_1\cos(\theta-\psi) = mU(I_d\sin\theta + I_q\cos\theta)$$

$$= \frac{mU\left[E_0(X_q\sin\theta - R_1\cos\theta) + R_1 U + \frac{1}{2}U(X_d - X_q)\sin 2\theta\right]}{R_1^2 + X_d X_q} \tag{5.4-4}$$

忽略定子电阻，式（5.4-4）也是电动机的电磁功率 P_{em}（W），再除以电动机的机械角速度 Ω，即可得电动机的电磁转矩（N·m）

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{mpE_0 U}{\omega X_d}\sin\theta + \frac{mpU^2}{2\omega}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\theta \tag{5.4-5}$$

式中，ω 为电动机的电角速度，$\omega = p\Omega$；p 为电动机的极对数。

图 5.4-11 是永磁同步电动机的矩角特性曲线。图 5.4-11（a）中曲线 1 为式（5.4-5）第 1 项，是由永磁气隙磁场与定子电枢反应磁场相互作用而产生的基本电磁转矩，又称为永磁转矩；曲线 2 为式（5.4-5）中第 2 项，即由于电动机的 d、q 轴磁路不对称而产生的磁阻转矩；曲线 3 为曲线 1 和曲线 2 的合成。由于永磁同步电动机直轴同步电抗 X_d 一般小于交轴同步电抗 X_q，磁阻转矩为一负正弦函数，因而矩角特性曲线上转矩最大值所对应的转矩角大于 90°，而不像电励磁同步电动机那样小于 90°，这是永磁同步电动机一个值得注意的特点。图 5.4-11（b）为某台永磁同步电动机的实测曲线，从中可看出，输出额定转矩时（$T_2/T_N=1$），电动机的转矩角约为 58°，输出最大转矩时电动机的转矩角约为 110°。

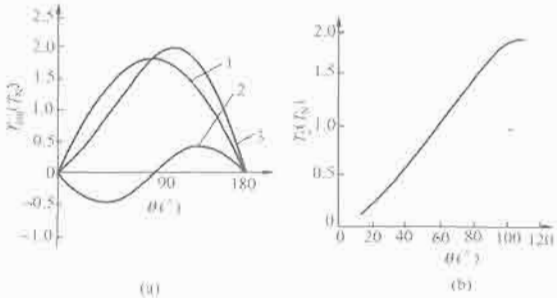


图 5.4-11　永磁同步电动机的矩角特性
（a）计算曲线；（b）实测曲线

矩角特性的转矩最大值 T_{max} 被称为永磁同步电动机的失步转矩，如果负载转矩超过此值，则电动机将不再保持同步转速。

3.2.2　工作特性曲线

计算出电动机的 E_0、X_d、X_q 和 R_1 等参数后，给定一系列不同的转矩角 θ，便可求出相应的输入功率、定子相电流和功率因数等，然后求出电动机此时的损耗，便可得到电动机的输出功率 P_2 和效率 η，从而得到电动机稳态运行性能（P_1、η、$\cos\varphi$ 和 I_1 等）与输出功率 P_2 之间的关系曲线，即电动机的工作特性曲线。图 5.4-12 为按以上步骤求出的某台永磁同步电动机的工作特性曲线。

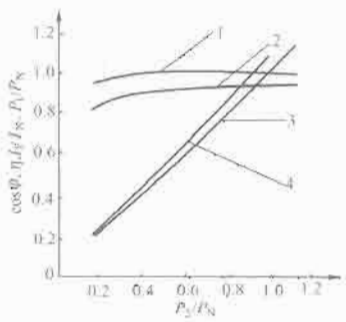


图 5.4-12　工作特性曲线
1—功率因数 $\cos\varphi$ 曲线；2—效率 η 曲线；
3—I_1/I_N 曲线；4—P_1/P_N 曲线

4　磁路分析与计算

4.1　磁路计算特点

图 5.4-13 为某台永磁同步电动机实测的空载气隙磁通

密度波形。图中该永磁同步电动机的空载气隙磁通密度波形基本上为一平顶波，与感应电动机的气隙磁通密度波形相差较大，而与直流电动机的空载气隙磁通密度波形相似。磁路计算时，永磁同步电动机的空载气隙磁通密度波形可近似简化为图 5.4-14 所示的矩形波，计算极弧宽度内磁通密度幅值为 B_δ，而极间磁通密度为零。

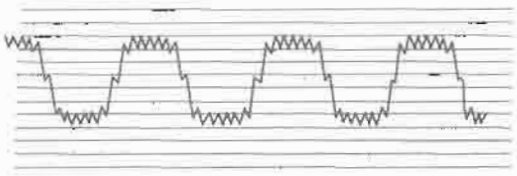


图 5.4-13 实测永磁同步电动机空载气隙磁通密度波形

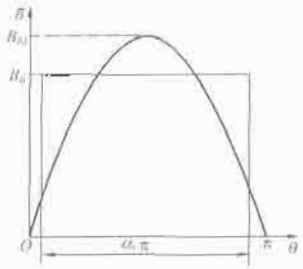


图 5.4-14 永磁同步电动机空载气隙磁通密度近似波形

4.1.1 计算极弧因数

永磁同步电动机转子磁极结构型式不同，其极弧因数 α_p 和计算极弧因数 α_i 的计算公式也不同。对采用图 5.4-5 (b)、(c) 和图 5.4-7 (c)、(d) 转子磁极结构的永磁同步电动机，经电磁场计算和气隙磁通密度波形分析，存在下列关系

$$\alpha_p = \frac{\frac{Q_2}{2p} - 1}{\frac{Q_2}{2p}} \tag{5.4-6}$$

$$\alpha_i = \alpha_p + \frac{4}{\frac{\tau_1}{\delta} + \frac{6}{1-\alpha_p}} \tag{5.4-7}$$

式中，Q_2 为永磁同步电动机转子槽数；τ_1 为电动机定子极距；δ 为气隙长度。

为使电动机的极弧因数更为合理，可通过调节上述结构中每个永磁体磁极所跨的转子槽数来调整极弧因数，比如，若令所跨的转子槽数为 $Q_2/(2p)-2$，则式 (5.4-6) 中的极弧因数公式变为

$$\alpha_p = \frac{\frac{Q_2}{2p} - 2}{\frac{Q_2}{2p}} \tag{5.4-8}$$

永磁磁极直接面向空气隙的表面式磁极结构（见图 5.4-4）的 α_p 的计算公式为

$$\alpha_p = \frac{b_M}{\tau_1} \tag{5.4-9}$$

式中，b_M 为每极永磁体所跨的弧长。其 α_i 需通过磁场计算求得。图 5.4-15 和图 5.4-16 示出了当 1 台表面式永磁同步电动机定子不变，而改变比值 h_M/δ 和极对数 p 时，利用磁场计算求得的 $\alpha_i = f(\delta/\tau)$ 曲线，供参考。

对图 5.4-5 (a)、图 5.4-6 和图 5.4-7 (a)、(b) 的转子磁极结构，电动机的 α_p 和 α_i 的计算公式分别为

$$\alpha_p = \frac{b}{\tau_1} \tag{5.4-10}$$

$$\alpha_i = \frac{b + 2\delta}{\tau_1} \tag{5.4-11}$$

式中，b 为电动机极靴弧长。

4.1.2 气隙磁场波形因数

如图 5.4-14 所示，经傅里叶级数分解后，可得永磁同步电动机空载气隙磁通密度基波幅值

$$B_{\delta 1} = \frac{4}{\pi} B_\delta \sin\frac{\alpha_i \pi}{2} \quad (\mathrm{T}) \tag{5.4-12}$$

因此，永磁同步电动机的空载气隙磁通密度波形因数

$$K_f = \frac{B_{\delta 1}}{B_\delta} = \frac{4}{\pi}\sin\frac{\alpha_i\pi}{2} \tag{5.4-13}$$

永磁同步电动机空载时永磁体提供的气隙总磁通

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{b_{m0} B_r A_m}{\sigma_0} \quad (\mathrm{Wb}) \tag{5.4-14}$$

式中，A_m 为永磁体提供每极磁通面积，m^2；σ_0 为空载漏磁因数。对径向结构：$A_m = b_M L_M$，对切向结构：$A_m = 2b_M L_M$；b_M 为永磁体磁极宽度，m，如永磁体为瓦片形，则 b_M 为弧长；L_M 为永磁体的轴向长度，m。

空载时永磁体提供的气隙基波磁通

$$\Phi_{10} = \frac{2}{\pi} B_{\delta 1} \tau_1 l_{ef} \quad (\mathrm{Wb}) \tag{5.4-15}$$

式中，l_{ef} 为电枢计算长度，m。

因此，电动机基波磁通 Φ_{10} 与气隙总磁通 $\Phi_{\delta 0}$ 之比，即永磁同步电动机气隙磁通的波形因数。

$$K_\Phi = \frac{\Phi_{10}}{\Phi_{\delta 0}} = \frac{8}{\pi^2 \alpha_i}\sin\frac{\alpha_i\pi}{2} \tag{5.4-16}$$

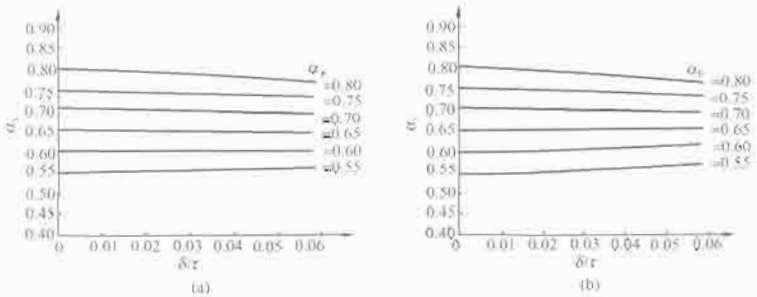


图 5.4-15 某径向充磁表面式永磁电机的计算极弧因数 α_i

(a) $h_M/\delta=4$；(b) $h_M/\delta=8$

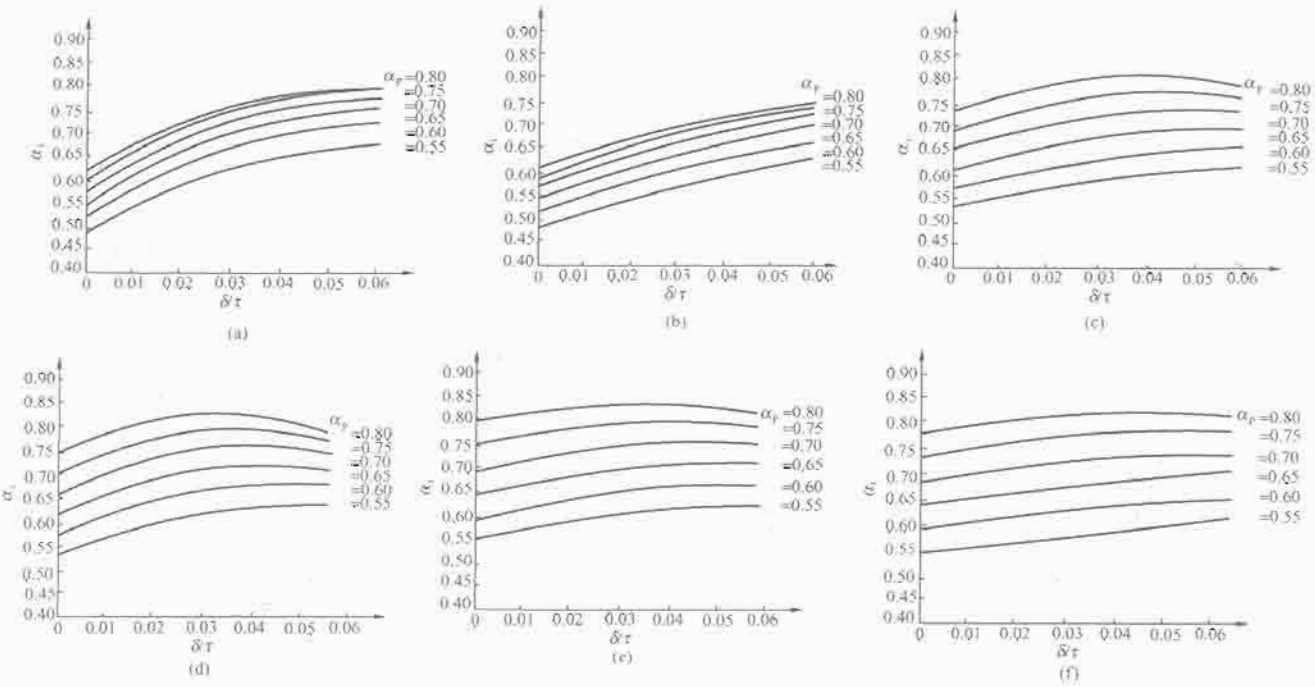


图 5.4-16　某平行充磁表面式永磁电机的计算极弧因数 α_i

(a) $h_M/\delta=4, p=1$；(b) $h_M/\delta=8, p=1$；(c) $h_M/\delta=4, p=2$；
(d) $h_M/\delta=8, p=2$；(e) $h_M/\delta=4, p=3$；(f) $h_M/\delta=8, p=3$

由式（5.4-16）可以看出，α_i 的大小影响气隙基波磁通与气隙总磁通的比值，即影响永磁材料的利用率。另外，α_i 的大小还影响气隙中谐波的大小。设计中选定 α_i 时应综合考虑永磁体的合理利用、谐波抑制和电机性能的需要。

4.1.3　磁位差计算

计算永磁同步电动机的磁路磁位差时，可采用其他电动机常用的方法。但由于永磁同步电动机的极弧因数一般较大，计算气隙和齿部磁位差时应该用 B_δ 而不是用 $B_{\delta 1}$；计算电动机轭部磁位差时，也应该用轭部铁心的有效总磁通 Φ_δ 而不是基波磁通 Φ_1。对于永磁磁极直接面向空气隙的表面式磁极结构，计算气隙因数和电枢计算长度时需要用电磁场计算求出。

4.2　空载漏磁因数

永磁同步电动机转子磁极结构多种多样，漏磁路径复杂多变，既有极间漏磁（有的电机还要计及齿顶漏磁），又有端部漏磁，用解析法计算漏磁因数的误差较大，一般只能用作粗略估算，需要准确计算时应运用电磁场数值解法求解电动机内电磁场。

为简化计算，有时可通过两次二维电磁场数值计算来分别求取电动机的极间漏磁因数 σ_1 和端部漏磁计算因数 σ_2'，则电动机的空载漏磁因数

$$\sigma_0 = k(\sigma_1 + \sigma_2 - 1) = k\left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2'}{l_{ef}}\right) \quad (5.4\text{-}17)$$

式中，σ_2 为永磁同步电动机的端部漏磁因数，$\sigma_2 = \sigma_2'/l_{ef} + 1$；$k$ 为经验修正系数。

图 5.4-17 和图 5.4-18 示出某台永磁同步电动机采用不同表面式磁极结构和不同气隙长度，永磁体径向充磁时的极间漏磁因数以及永磁电动机的定子不变，而改变永磁体磁化方向长度和气隙长度时的端部漏磁计算因数，供参考。在图示的极弧因数范围内，极弧因数越大，气隙长度越小，则电机的极间漏磁因数越小。在正常设计取值范围内，永磁体的磁化方向长度越大，电动机的气隙长度越大，则永磁体端部漏磁计算因数越大。

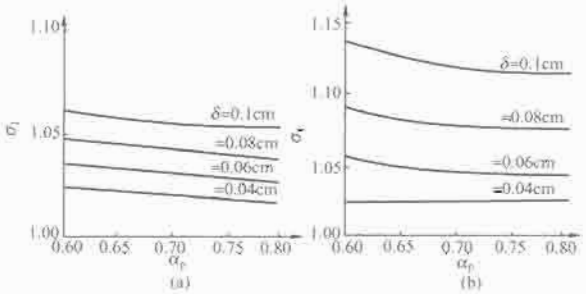


图 5.4-17　某表面式永磁同步电动机极间漏磁因数 σ_1

(a) 表面凸出式；(b) 表面插入式

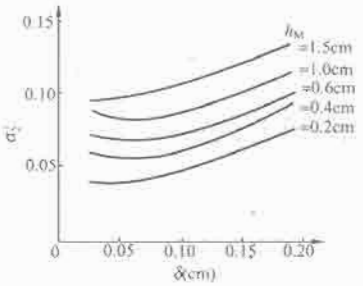


图 5.4-18　某表面式永磁同步电动机端部漏磁计算因数 σ_2'

内置式转子磁极结构的永磁同步电动机的磁路结构虽然多种多样，但对电动机极间漏磁因数影响最大的是它所采用的隔磁磁桥的尺寸（见图 5.4-19）和永磁体的尺寸。

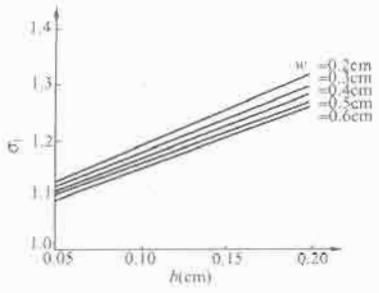


图 5.4-19 某内置式永磁同步电动机极间漏磁因数 σ_1—隔磁磁桥尺寸曲线
(b_M=5.0cm; h_M=0.2cm)

图 5.4-19 给出了某台内置式永磁同步电动机不同磁桥尺寸对极间漏磁因数的影响曲线，供参考。由图可见，隔磁磁桥的尺寸对极间漏磁因数的影响极为关键。为降低漏磁因数，在设计电动机时应在保证制造工艺、电动机的转子冲片机械强度和冲模使用寿命的前提下，尽量限制隔磁磁桥宽度，而适当加长其长度。

图 5.4-20 给出了在隔磁磁桥确定后，某内置式永磁同步电动机中永磁体尺寸和电动机气隙长度对极间漏磁因数的影响曲线，供参考。由图可见，永磁体尺寸越大，气隙长度越小，电动机极间漏磁因数也越小。

内置径向式永磁同步电动机端部漏磁因数除与气隙长度和永磁体磁化方向长度有关外，还与永磁体离转子表面

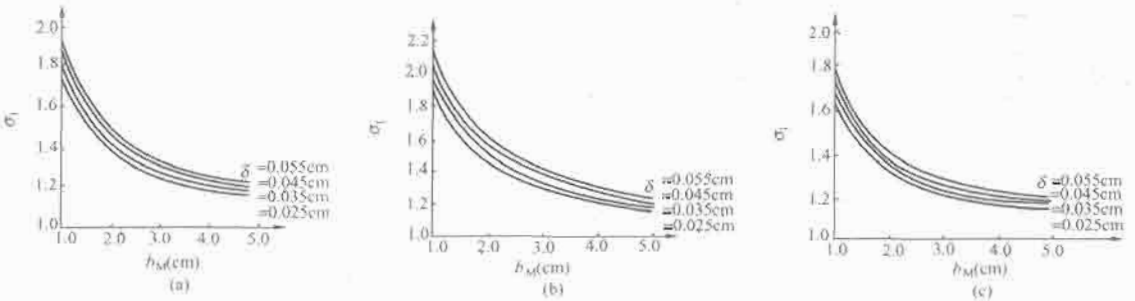


图 5.4-20 内置式永磁同步电动机极间漏磁因数 σ_1—永磁体尺寸曲线
(a) h_M = 0.2cm；(b) h_M = 0.4cm；(c) h_M = 0.8cm

的距离有较大的关系，永磁体离转子表面越近，端部漏磁因数越小。图 5.4-21 给出了某内置径向式永磁同步电动机的端部漏磁计算因数与气隙长度和永磁体磁化方向长度的关系曲线（永磁体磁极外表面与转子表面的最大距离为 0.8cm）。

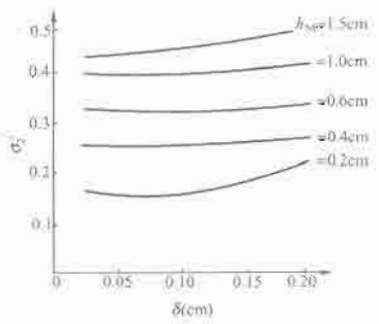


图 5.4-21 内置径向式永磁同步电动机端部漏磁计算系数 σ'_2

由于影响永磁同步电动机漏磁因数的因素众多，具体设计电动机时，应根据经验和实验合理地选取式（5.4-17）中修正系数 k 的值。

4.3 永磁体工作点的计算

永磁体工作点包括空载、额定负载和最大去磁时的工作点。求取永磁体各工作点时，一般采用第 2 章所介绍的等效磁路法，并考虑永磁同步电动机的磁路特点。

4.3.1 空载和负载工作点的计算特点

永磁同步电动机的转子磁极结构有径向式、切向式和混合式。为避免计算时混淆，以永磁同步电动机每对极的磁动势 F_c 和每极磁通 Φ_r 作为计算量。

对径向式结构

$$F_c = 2H_c h_M \quad (A)$$
$$\Phi_r = B_r A_m = B_r b_M L_M \quad (Wb) \qquad (5.4-18)$$

对切向式结构

$$F_c = H_c h_M$$
$$\Phi_r = B_r A_m = 2B_r b_M L_M \qquad (5.4-19)$$

式中，B_r、H_c 为在工作温度下永磁材料的计算剩磁密度和计算矫顽力。

经磁路计算所得的电动机每对极主磁路的总磁位差为

$$\sum\overline{F} = F_\delta + F_{t1} + F_{j1} + F_{t2} + F_{j2} \quad (A) \qquad (5.4-20)$$

式中，F_δ、F_{t1}、F_{j1}、F_{t2} 和 F_{j2} 分别为电动机每对极的气隙、定子齿、定子轭、转子齿、转子轭等部位的磁位差（A）。如果电动机无转子齿（如表面式转子），则式（5.4-20）中不含 F_{t2} 项。

永磁同步电动机直轴电枢磁动势

$$F_{ad} = \frac{1.35K_{dp}NK_{ad}}{p} I_d \quad (A/极) \qquad (5.4-21)$$

则其作用于永磁体的去（增）磁磁动势标么值

$$f'_\delta = \frac{2F_{ad}}{F_c\sigma_0} = \frac{2.7K_{dp}N}{\sigma_0 pF_c} K_{ad} I_d \qquad (5.4-22)$$

式中，K_{ad} 为电动机直轴电枢磁动势折算系数。

4.3.2 最大去磁时永磁体工作点校核计算

永磁体尺寸设计不合理、漏磁因数过小、电枢反应过大、所选用永磁材料的内禀矫顽力过低以及电动机工作温度过高等因素都可导致电动机中永磁体的失磁。准确计算并合理设计永磁体的最大去磁工作点，是电动机设计中解决永磁体失磁问题的前提。

对调速永磁同步电动机来说，其永磁体去磁最严重的情况是运行中的电动机绕组突然短路，短路电流产生直轴磁动势而对永磁体起去磁作用。电动机短路时的去磁电流（A）近似为

$$I_h \approx \frac{E_0}{X''_d} \qquad (5.4-23)$$

式中，X''_d 为电动机突然短路时对应的瞬态电抗。

异步起动永磁同步电动机起动时，定子磁场和永磁磁场

的旋转速度不同，两磁场的相对位置不断变化。当两磁场方向相反时，电枢磁动势对永磁体起去磁作用。当电动机转子转速接近定子磁场转速（转差率趋于零）时，由于转子起动笼对转子内永磁体的屏蔽作用减弱，此时电枢磁动势对永磁体的去磁作用最为严重。通常称起动过程中转子转速接近同步转速时电枢磁动势和转子磁场轴线重合且方向相反的位置为“反接位置”，称这种运行状态为“反接状态”。反接状态下，定子电流只有直轴分量，且定子电流 $\dot{I}_h$ 超前 $\dot{E}$ 90°电角度。因为反接状态时电动机转速非常接近同步转速，故可近似采用同步运行时的参数。可画出不计电动机电枢绕组电阻时的电动机相量图，如图 5.4-22（a）所示。图 5.4-22（b）为计及定子绕组电阻时的电动机相量图。

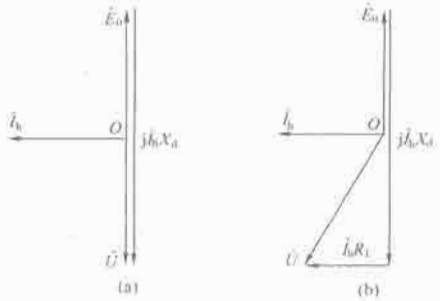


图 5.4-22　“反接状态”时电动机相量图
（a）$R_1=0$ 的相量图；（b）$R_1\neq 0$ 的相量图

从图 5.4-22（a）中可以求出不计定子绕组电阻时的最大去磁电流

$$I_h = \frac{E_0 + U}{X_d} \quad (A) \tag{5.4-24}$$

计及定子绕组时，定子电流

$$I_h = \frac{E_0 X_d + \sqrt{E_0^2 X_d^2 - (R_1^2 + X_d^2)(E_0^2 - U^2)}}{R_1^2 + X_d^2} \quad (A) \tag{5.4-25}$$

根据电动机的类型，以式（5.4-23）或式（5.4-25）算出的 I_h 替代式（5.4-22）中的 I_d，求得的电枢磁动势再代入式（5.2-38），求出的永磁体负载工作点即为永磁体的最大去磁工作点（b_{mh}，h_{mh}）。实际设计永磁同步电动机时，应使永磁体的最大去磁工作点高于所采用永磁材料在最高工作温度（铁氧体永磁为最低工作温度）下退磁曲线的拐点（b_k，h_k），并留有一定裕度。

但是用等效磁路法求得的是永磁体的平均工作点。在需要准确计算时，就应用本篇第 2 章介绍的电磁场数值算法，直接求出在各种工况下的永磁体局部工作点的分布情况。

5　参数计算和分析

5.1　空载反电动势

空载反电动势 E_0（V）由电动机中永磁体产生的空载气隙基波磁通在电枢绕组中感应产生，其值为

$$E_0 = 4.44 f K_{dp} N K_\Phi \frac{b_{m0} B_r A_m}{\sigma_0} \tag{5.4-26}$$

E_0 的大小不仅决定电动机是运行于增磁状态还是去磁状态，而且对电动机的动、稳态性能均有很大的影响。正如普通电励磁同步电动机定子电流 I_1 与励磁电流 I_f 的关系为一 V 形曲线一样，当永磁同步电动机其他参数不变，而仅改变永磁体的尺寸或永磁体的性能时，曲线 $I_1=f(E_0)$ 也是一条 V 形曲线。图 5.4-23 为某台永磁同步电动机在额定负载下定子电流 I_1 与 E_0 的关系曲线。

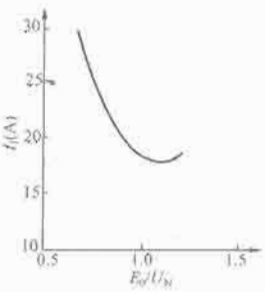


图 5.4-23
$I_1=f(E_0/U_N)$ 曲线

空载损耗 P_0 与空载电流 I_0 是永磁同步电动机出厂试验的两个重要指标，而 E_0 对这两个指标的影响尤其大。E_0 变动时，空载损耗 P_0 和空载电流 I_0 也有一个最小值。某台永磁同步电动机的 $P_0=f(E_0/U_N)$ 曲线和 I_0、I_{d0}、$I_{q0}=f(E_0/U_N)$ 曲线分别示于图 5.4-24 和图 5.4-25（I_{d0} 和 I_{q0} 分别为电动机空载电流直、交轴分量）。永磁同步电动机的 E_0 设计得过大或过小，都会导致 P_0 和 I_0 上升，这是因为 E_0 过大或过小都会导致空载电流中的直轴电流分量 $|I_{d0}|$ 急剧增大。

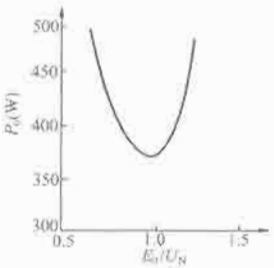


图 5.4-24
$P_0=f(E_0/U_N)$

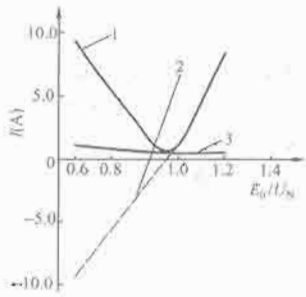


图 5.4-25　空载电流－E_0/U_N 曲线
1—I_0 曲线；2—I_{d0} 曲线；
3—I_{q0} 曲线

可见，合理设计 E_0，可降低定子电流，提高电动机效率和功率因数，降低电动机的温升。设计实践表明，所有设计比较成功的永磁电动机，其 E_0 与额定电压的比值均在一定的合理范围内。但应注意，对不同用途的电动机，E_0 的取值范围应有所不同，见表 5.4-1。

表 5.4-1　不同用途电动机 E_0 的取值范围

用　途	E_0 取值范围 E_0/U_N
风机、水泵用永磁同步电动机	0.95～1.0
油田抽油机用永磁同步电动机	
屏蔽泵用永磁同步电动机	0.9～1.0
化纤、纺织用永磁同步电动机	0.7～0.9
调速永磁同步电动机	
机床用伺服电动机	

5.2　交、直轴电枢反应电抗

对一台内置式永磁同步电动机的电磁场进行数值计算发现：当电动机直轴电流 I_d 从 $0.005I_N$ 增大到 I_N 时，其直轴电枢反应电抗 X_{ad} 从 33.0Ω 增至 35.0Ω；而当交轴电流从 $0.008I_N$ 增大到 I_N 时，交轴电枢反应电抗 X_{aq} 从 124.4Ω 降至 89.7Ω。可见，在计算永磁同步电动机的交、直轴电抗时，可不考虑 X_{ad} 的非线性，但必须考虑交轴磁路的饱和对 X_{aq} 的影响。

从电动机相量图出发，可得电动机直轴内电动势

$$E_d = E_0 \pm I_d X_{ad} \quad (V) \tag{5.4-27}$$

式中，当电动机运行于去磁状态时取“－”；当电动机运行于增磁状态时取“＋”。由此可得直轴电枢反应电抗

$$X_{ad}=\frac{|E_0-E_d|}{I_d}\quad(\Omega)\qquad(5.4\text{-}28)$$

式中，E_d 可由下式求得

$$E_d=4.44fK_{dp}N\Phi_{1N}\quad(V)\qquad(5.4\text{-}29)$$

式中，Φ_{1N}为直轴电枢电流等于 I_d 时的直轴合成基波气隙磁通，Wb。

$$\Phi_{1N}=[b_{mN}-(1-b_{mN})\lambda_\sigma]B_rA_mK_\Phi\qquad(5.4\text{-}30)$$

式中，b_{mN}为直轴电流等于 I_d 时永磁体的负载工作点。

所以直轴电枢反应电抗为

$$X_{ad}=\frac{4.44fK_{dp}N|\Phi_{10}-\Phi_{1N}|}{I_d}\quad(\Omega)\qquad(5.4\text{-}31)$$

考虑交轴磁路饱和时 X_{aq}需迭代求解，其步骤如下：

1）给定某一转矩角 θ。

2）假设交轴电流分量 I'_q，则交轴电枢磁动势

$$F_{aq1}=\frac{1.35K_{dp}NK_{aq1}I'_q}{p}\qquad(5.4\text{-}32)$$

式中，K_{aq1}为交轴电枢磁动势折算系数。

3）根据 F_{aq1}由预先算得的 $\Phi_{aq1}-F_{aq1}$曲线查取相应的 Φ_{aq1}。

4）由 Φ_{aq1}求出交轴电枢反应电动势

$$E_{aq1}=4.44fK_{dp}N\Phi_{aq1}\quad(V)\qquad(5.4\text{-}33)$$

5）计算 X_q

$$X_q=X_1+\frac{E_{aq1}}{I'_q}=X_1+X_{aq}\qquad(5.4\text{-}34)$$

6）代入式（5.4-35）求出交轴电枢电流计算值

$$I_q=\frac{X_dU\sin\theta-R_1(E_0-U\cos\theta)}{R_1^2+X_dX_q}\qquad(5.4\text{-}35)$$

7）比较 I'_q，重复2）～6）步，反复进行迭代计算，直至 I'_q 与 I_q 间的误差在容许范围内。

上述步骤中，由 $\Phi_{aq1}-F_{aq1}$曲线查 Φ_{aq1}的步骤考虑了交轴磁路的饱和，而迭代过程则保证电动机在一定的负载下（即一定的转矩角下）满足确定的相量关系。

需要指出的是，上面第3）步所查的 $\Phi_{aq1}-F_{aq1}$曲线是预先算出的交轴磁路磁化曲线，并且曲线中的磁通和磁动势应为正弦量。给定正弦量 F_{aq1}，不同转子磁极结构的电动机产生的电枢反应磁通波形也不一样，即存在一个磁通波形因数 $K_{\Phi q1}=\Phi_{aq1}/\Phi_{aq1}$。对表面凸出式永磁同步电动机，$K_{\Phi q1}=1$；对内置径向式永磁同步电动机，$K_{\Phi q1}$可近似取为1；而对表面插入式永磁同步电动机，则 $K_{\Phi q1}$与1间的偏差较大，此时 $K_{\Phi q1}$与电动机的极弧因数 α_p 有着密切的关系，α_p 越小，则 $K_{\Phi q1}$越接近1，实际设计时应加以注意。

上面分析中，计算 X_{ad}和 X_{aq}时没有考虑d、q轴磁场“共磁路”所引起的 X_{ad}和 X_{aq}的变化。事实上，d、q轴磁通在定转子铁心中都有一部分磁路是公共的，因而d、q轴磁场之间的相互影响比较严重。例如某台永磁同步电动机，仅考虑永磁体励磁作用时，气隙磁通密度 $B_\delta=0.4192$T；仅考虑q轴电枢电流 I_q 时交轴气隙磁通密度为 $B_{q1}=0.2722$T；二者同时考虑时产生的气隙磁通密度 $B_{d1}=0.4168$T，$B_{q1}=0.1823$T。由此可见，尽管q轴磁路没有永磁体，但却受到d轴上永磁体磁场的很大影响，使q轴磁通密度由0.2722T变到0.1823T。因此计算 X_{ad}和 X_{aq}时d、q轴的“共磁路”问题必须给予重视。用第五篇第2章介绍的“负载法”计算 X_{ad}和 X_{aq}，既可考虑磁路的饱和，又计及d、q轴磁场的相互影响。图5.4-26和图5.4-27为“负载法”计算某台永磁同步电动机所得的 I_q 对 X_{ad}和 I_d 对 X_{aq}影响的曲线，供参考。

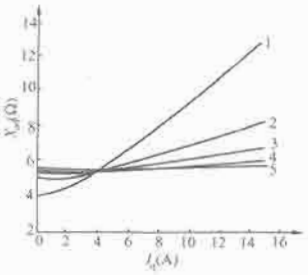


图5.4-26 I_q 对 X_{ad}的影响
1—I_d=3A；2—I_d=6A；3—I_d=9A；4—I_d=12A；5—I_d=15A

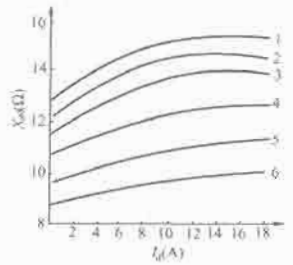


图5.4-27 I_d 对 X_{aq}的影响
1—I_q=3A；2—I_q=6A；3—I_q=9A；4—I_q=12A；5—I_q=15A；6—I_q=18A

相对来说，X_{ad}对永磁同步电动机性能的影响比 X_{aq}对电动机性能的影响更加敏感。增加永磁体的磁化方向长度以减少 X_{ad}，可明显提高电动机的过载能力，但对恒功率调速运行电动机的弱磁扩速能力不利。为了得到较高的功率因数和空载反电动势 E_0、可增加电动机的绕组匝数和铁心长度，但这同时会导致 X_{ad}和 X_{aq}的增大，使电动机过载能力变小，牵入同步能力变差。

5.3 交、直轴电枢磁动势折算系数

交、直轴电枢磁动势折算系数 K_{aq}和 K_{ad}反映了电动机磁极结构对电动机电枢反应电抗 X_{aq}和 X_{ad}的影响。转子磁极结构不同，电动机的交、直轴电枢磁动势折算系数也各有差别。根据定义可知，$K_{ad}=K_d/K_f$，$K_{aq}=K_q/K_f$。K_f 可由式（5.4-13）确定，K_q 和 K_d 为电动机交、直轴电枢反应磁通密度的波形因数。

对近似于隐极电动机性能的表面凸出式永磁同步电动机，$K_q=K_d=1$，因而其交、直轴电枢磁动势折算系数为

$$K_{aq}=K_{ad}=\frac{1}{K_f}=\frac{\pi}{4\sin\frac{\alpha_i\pi}{2}}\qquad(5.4\text{-}36)$$

而对表面插入式和内置式永磁同步电动机，则 K_q 和 K_d 与电动机的极弧因数、永磁体尺寸和电动机气隙长度等许多因素有关，一般需用电磁场数值计算求出气隙磁场分布，然后用谐波分析确定其基波后得出。

6 异步起动永磁同步电动机的起动过程

异步起动永磁同步电动机与普通感应电动机的一样，在起动过程中也要求具有一定的堵转转矩倍数、堵转电流倍数和最小转矩倍数。此外，还要求电动机具有足够的牵入同步能力。永磁同步电动机由于在转子上安放了永磁体，使其起动过程比感应电动机更为复杂；在起动过程中既有平均转矩，又有脉动转矩，且这些转矩的幅值均随电动机转速的改变而变化。

6.1 起动过程中的电磁转矩

6.1.1 起动过程中的平均转矩

（1）不考虑永磁体作用

为清楚起见，先不考虑永磁体的作用，就可把三相永磁同步电动机看成一台转子磁路不对称的三相感应电动机。在起动过程中，当定子绕组馈以频率为 f 的三相对称交流电

流时，在气隙中产生的磁场以同步转速 n_1 旋转。设起动某一瞬间电动机的转差率为 s，电动机转子以 $n=(1-s)n_1$ 的转速旋转，则在转子起动绕组中感应出频率为 sf 的交流电流。由于转子磁路的不对称，$X_d \neq X_q$，转子电流所产生的磁场可分为正、反两个旋转磁场，相对于转子的转速分别为 sn_1 和 $-sn_1$，相对于定子的转速分别为 $n+sn_1=n_1$ 和 $n-sn_1=(1-2s)n_1$。

转子的正转旋转磁场与定子旋转磁场的转速都是 n_1（相对于定子），彼此相对静止，相互作用产生感应电动机一样的异步转矩 T_a，如图 5.4-28 中曲线 1 所示。

转子的反转旋转磁场在定子绕组中感应的频率为 $(1-2s)f$ 的电流 I_b，I_b 所产生的定子旋转磁场转速也是 $(1-2s)n_1$，与转子反转磁场也是相对静止，两者相互作用产生另一异步转矩，称为磁阻负序分量转矩 T_b。这相当于又一台感应电动机，但转子是初级绕组，定子是次级绕组。当 $n=n_1/2$，即 $s=0.5$ 时，$(1-2s)f=0$，相当于这台感应电动机运行于同步转速，在次级绕组中（定子）中无感应电流，转矩为零。当 $n>n_1/2$，即 $s<0.5$，$(1-2s)n_1$ 为正值，这意味着这一对旋转磁场的转向与 n_1 相同，作为次级绕组的定子受到沿 n_1 方向的异步转矩；但定子不动，故转子受到一个与 n_1 方向相反的转矩，即制动转矩，$T_b<0$。当 $n<n_1/2$，即 $s>0.5$ 时，转子受到一个与 n_1 方向相同的转矩，$T_b>0$，如图 5.4-28 中曲线 2 所示。

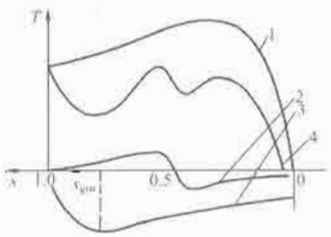


图 5.4-28　异步起动永磁同步电动机的平均转矩—转差率曲线

1—T_a-s 曲线；2—T_b-s 曲线；3—T_g-s 曲线；4—1，2，3 的合成曲线

（2）考虑永磁体作用

转子永磁体所产生的磁场以 $n=(1-s)n_1$ 旋转，在定子绕组中感应出频率为 $(1-s)f$ 的电流 I_g，这相当于一台转速为 n 的定子绕组通过电网短路的同步发电机，对转子作用的是发电制动转矩 T_g，如图 5.4-28 中曲线 3 所示。

因此，永磁同步电动机起动过程中的总平均转矩 T_{av} 由 T_a、T_b 和 T_g 三个平均转矩分量构成，即

$$T_{av}=T_a+T_b+T_g \tag{5.4-37}$$

图 5.4-28 为异步起动永磁同步电动机平均转矩随电动机转差率变化的曲线。图中，曲线 4 为曲线 1、2、3 三者的合成，即电动机的总合成转矩 T_{av}。从图可知，永磁同步电动机在异步起动过程中出现两个最小转矩，一个出现在低速处，一个出现在稍高于半同步转速处。

由于永磁同步电动机的转子磁路不对称，T_a 和 T_b 的准确计算非常复杂，工程实际中常用近似的方法计算。实践表明，对于设计合理的永磁同步电动机，由 T_b 导致的最小转矩值通常大于由 T_g 导致的最小转矩值，在不要求得出具体的转矩转速曲线时，可以将 T_a 与 T_b 合并计算（$T_a+T_b=T_c$），且近似采用感应电动机的转矩公式［见式（5.4-38）］计算 T_c（N·m），再根据经验加以修正

$$T_c=\frac{mpU_1^2R_2'/s}{2\pi f[(R_1+c_1R_2'/s)^2+(X_1+c_1X_2')^2]} \tag{5.4-38}$$

式中，c_1 为由于采用感应电动机 Γ 形近似等效电路而引入的修正系数，$c_1=1+\dfrac{X_1}{X_m}$；R_2' 为转子电阻折算值，Ω；X_2' 为转子漏抗折算值，Ω。

永磁同步电动机转子上永磁体槽的存在，使其励磁电抗与普通感应电动机相比有较大的差别。实验表明，同样结构尺寸、绕组和气隙的情况下，永磁同步电动机的 X_{aq} 比普通感应电动机的 X_m 稍小，而 X_{ad} 则比 X_m 小得多。因此，在引用式（5.4-38）计算转矩时，永磁同步电动机的等效励磁电抗 X_m 应按下式予以修正

$$X_m=\frac{2X_{ad}X_{aq}}{X_{ad}+X_{aq}} \tag{5.4-39}$$

经过复杂的推导可得式 T_g（N·m）为

$$T_g=-\frac{mp}{2\pi f(1-s)}\left[\frac{R_1^2+X_q^2(1-s)^2}{R_1^2+X_dX_q(1-s)^2}\right]\times\left[\frac{R_1E_0^2(1-s)^2}{R_1^2+X_dX_q(1-s)^2}\right] \tag{5.4-40}$$

上式中第 2 个中括号内的因式是该式的主要项，表示永磁体磁链所产生的转矩；第一个中括号内的值代表电动机转子凸极效应所引起的凸极效应系数，当 $X_d=X_q$ 时，该中括号内的值为 1。此时式（5.4-40）所示的转矩为

$$T_g=-\frac{mp}{2\pi f(1-s)}\frac{R_1E_0^2(1-s)^2}{R_1^2+X_dX_q(1-s)^2} \tag{5.4-41}$$

永磁同步电动机起动过程中永磁体产生平均制动转矩 T_g 的工况相当于一台空载电动势为 $(1-s)E_0$，交、直轴同步电抗分别为 $(1-s)X_q$ 和 $(1-s)X_d$ 的发电机在短路运行时的工况。此时，短路电流在定子电阻上产生的电阻损耗，体现在转轴上，相当于施加给转轴一个制动转矩 T_g。经仔细推导，可知式（5.4-40）中的两个中括号之积即等于电动机定子绕组每相的电阻损耗。

将式（5.4-41）对 s 微分，并令微商等于零，可得 T_g 达最大值时的转差率

$$s_{gm}=1-\frac{R_1}{X_q}\sqrt{\frac{3(X_q-X_d)}{2X_d}+\sqrt{\left[\frac{3(X_q-X_d)}{2X_d}\right]^2+\frac{X_q}{X_d}}} \tag{5.4-42}$$

当 X_d 和 X_q 一定时，s_{gm} 与定子电阻 R_1 有关。R_1 越大，则 s_{gm} 越小，即 T_g 达到最大值时的转速越大。

一般来说，永磁发电制动转矩对小容量电动机的平均转矩 T_{av} 影响较大，而对大容量电动机的影响则相对小些。

6.1.2　起动过程中的脉动转矩

由前面分析可知，永磁同步电动机起动过程中气隙中存在三种以不同转速旋转的磁场，其转速分别为 n_1、$(1-s)n_1$ 和 $(1-2s)n_1$。转速相同的定转子磁场相互作用产生三个平均转矩。而转速不同的定转子磁场间的相互作用则产生平均值为零的脉动转矩。

转速为 n_1 的定（转）子磁场与转速为 $(1-2s)n_1$ 的转

（定）子磁场相互作用产生脉动频率为 $2sf$ 的脉动转矩，这是由于转子起动绕组的存在和转子磁路不对称而引起的磁阻脉动转矩，其幅值为 T_{pc}。T_{pc} 与电动机中的永磁体无关，只与电动机转子交、直轴磁路的不对称程度有关。当 $X_d = X_q$ 时，此脉动转矩将不存在。

转速为 $(1-s)n_1$ 的永磁磁场与转速为 n_1 和 $(1-2s)n_1$ 的磁场相互作用产生脉动频率为 sf 的脉动转矩，其幅值 T_{pm} 与电动机的永磁体、定子绕组和转子磁路的不对称程度有关。

上述两个脉动转矩中，由永磁体磁场引起的脉动转矩幅值 T_{pm} 远大于由转子起动绕组和磁路不对称所引起的脉动转矩幅值 T_{pc}。

为便于分析，假设整个起动过程非常缓慢，电动机在不同异步转速下稳定运行。从描述异步起动永磁同步电动机瞬态行为的复数形式微分方程出发，经过一系列复杂的运算和整理后，可得起动过程中的电磁转矩表达式如下

$$\begin{aligned} T_{em} &= T_g + T_r + T_{pm1}\sin\theta + T_{pm2}\cos\theta + T_{pc1}\sin 2\theta + \\ &\quad T_{pc2}\cos 2\theta \\ &= T_{av} + T_{pm}\cos(\theta-\beta) + T_{pc}\cos(2\theta-\alpha) \end{aligned} \tag{5.4-43}$$

式中，$\beta = \arctan\dfrac{T_{pm1}}{T_{pm2}}$；$\alpha = \arctan\dfrac{T_{pc1}}{T_{pc2}}$。

6.1.3 瞬态起动性能分析

研究异步起动永磁同步电动机的瞬态起动性能时，可采用传统的把电动机等效为集中参数模型的数字仿真方法，也可以应用本篇第2章介绍的采用场路耦合法计算瞬变电磁场的方法。前一种方法具有计算量小、计算速度快等优点，但该方法难以考虑电动机的饱和与涡流的影响，会带来较大的误差。采用场路耦合法求解瞬变电磁场的方法可以考虑饱和与涡流的影响，但其计算量相对传统的数字仿真方法大得多。下面简要介绍采用场路耦合求解瞬变电磁场来研究电动机瞬态起动性能的过程。

起动过程中，电动机的机械运动方程为

$$J\frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - T_L \tag{5.4-44}$$

式中，J 为电动机和负载的转动惯量；T_L 为电动机负载转矩（含摩擦转矩），接近同步转速时，可认为是一个常数。

为考虑机、电系统的相互作用，机械运动方程与瞬变电磁场方程必须同时求解。电动机瞬态起动性能的求解过程如下：

1）假定转子在 Δt 时间内旋转了 $\Delta\theta$ 角度，由此确定出某时刻电动机的角速度 Ω。

2）解场路耦合方程，得到该时刻的场分布，求出此时的电磁转矩。

3）以2）步算出的电磁转矩为已知量，解机械运动方程求得角速度 Ω。

4）如果角速度计算值 Ω 与假定值 Ω' 之间误差小于允许值，则继续计算 $t+\Delta t$ 时刻；否则，修正旋转角速度 $\Delta\theta$，重复2）、3）两步。

图5.4-29为某台异步起动永磁同步电动机瞬态性能曲线，其中图（d）为考虑脉动分量后的瞬态 $T-n$ 曲线。

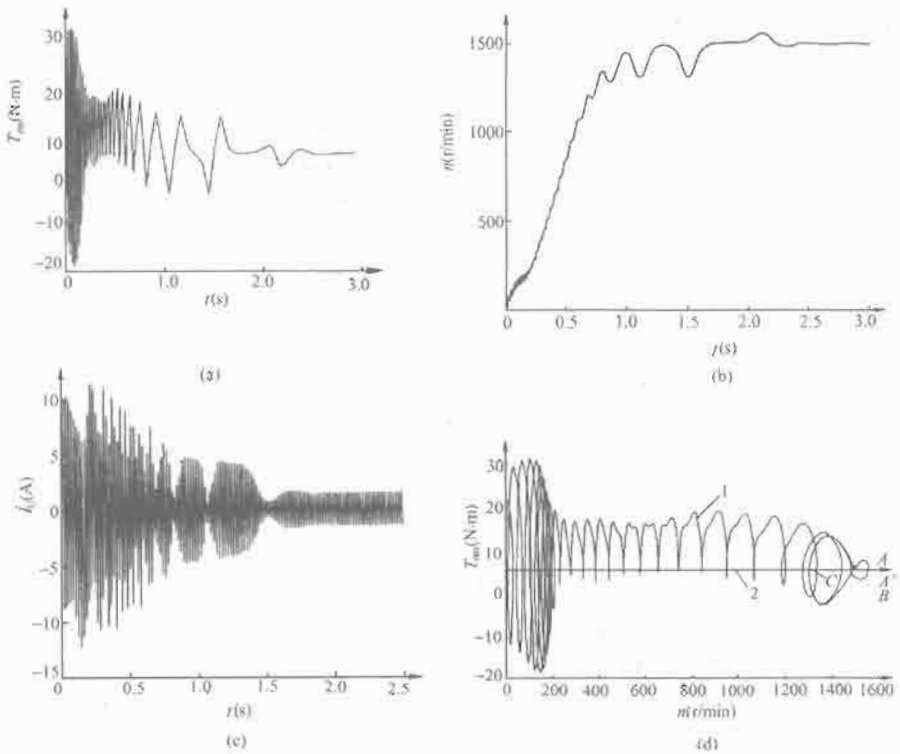


图5.4-29 某台永磁同步电动机起动过程的瞬态性能曲线

（a）$T-t$ 曲线；（b）$n-t$ 曲线；（c）$i-t$ 曲线；（d）$T-n$ 曲线

1—瞬态转矩；2—负载转矩

6.2　起动过程中的定子电流

从前面分析可知，永磁同步电动机起动过程中，定子绕组中流过三个分量的电流：频率为 f 的电流 i_a、磁阻负序分量磁场感生的频率为 $(1-2s)f$ 的电流 i_b 和永磁气隙磁场感生的频率为 $(1-s)f$ 的电流 i_g。因此起动电流的有效值

$$I_{st}=\sqrt{I_a^2+I_b^2+I_g^2} \tag{5.4-45}$$

由此可见，永磁同步电动机的起动电流比同规格的普通感应电动机的大。

6.3　牵入同步过程

有些电动机，如某些化纤机械用的永磁同步电动机，其稳态运行时的负载转矩并不是很大，但负载的转动惯量却相当大，这就要求电动机在带有规定转动惯量的负载时具有足够大的牵入同步能力。因此，弄清牵入同步的机理和准确计算电动机牵入同步能力对这类电动机的设计与运行极为重要。

6.3.1　牵入同步机理

由式（5.4-44），可以把异步起动永磁同步电动机的机械运动方程表示为

$$T_{em}-T_L=J\frac{d\Omega}{dt}=\frac{J}{p}(s-1)\omega_s^2\frac{ds}{d\theta} \tag{5.4-46}$$

式中，ω_s 为电动机同步电角速度。

牵入同步过程中转子能量的增加应等于该过程中转矩所做的功。若负载转矩较大，电动机负载转矩曲线与电磁转矩曲线的交点所对应的转速离同步转速较远，即牵入同步过程开始时转差率比较大，意味着需要更多的能量以加速该负载到同步转速。同样，系统转动惯量越大，相应牵入同步所需的能量也越大，电动机越难牵入同步。

因此，电动机能否达到同步转速，既与电动机的负载转矩、牵入同步时的脉动转矩和系统（包括电动机和负载）的转动惯量有关，也与电动机平均转矩—转速特性曲线［见图 5.4-28］在接近同步转速时的陡度有关。

电动机从接近同步转速开始到牵入同步过程中，如果电磁转矩足够大，则使电动机升速到超过同步转速，然后又减速，使转子转速围绕同步转速振荡。由于稳态同步转矩的作用，使其振荡衰减，转子逐渐牵入同步。这反映在转矩—转速轨迹上［见图 5.4-29（d）］为一系列顺时针方向旋转的近似椭圆的曲线，电动机的转差率在接近零的最小值和最大值之间变动。

牵入同步的最后过程还可用如图 5.4-30 所示的永磁同步电动机矩角特性曲线来分析。开始时电动机工作于电磁转矩曲线与负载转矩曲线的交点 A′点，对应的转矩角为 θ_1'。A′点为非稳定工作点，如果有一个减少 θ 的扰动，便会导致电动机加速，最后稳定运行于稳态工作点 A 点，如图中虚线所示。图 5.4-30 中的 A′点和 A 点也对应于图 5.4-29（d）中的 A′点和 A 点。如果有一个增加 θ 的扰动，由于 $T_{em}<T_L$，导致电动机减速，进入下一个近似椭圆形转矩—转速轨迹运行。

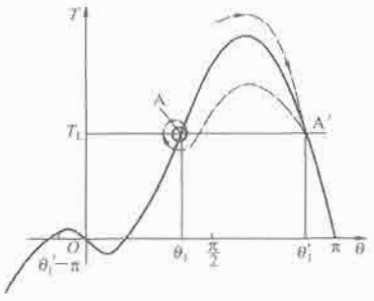


图 5.4-30　永磁同步电动机的矩角特性

为进一步分析牵入同步能力，画出牵入同步过程的转差率—转矩角曲线，如图 5.4-31 所示［图中标注的各点均对应于图 5.4-29（d）中的相应点］。从图中可以看出，转差率以 2π 电弧度为极差很有规律地变化，而从 B 点到 A′点表示同步前的最后一个极差轨迹。为便于得出简明的关系，将同步前的最后一个极差内转差率与转矩角间的复杂关系近似按正弦关系变化的虚线来代替，其表达式为

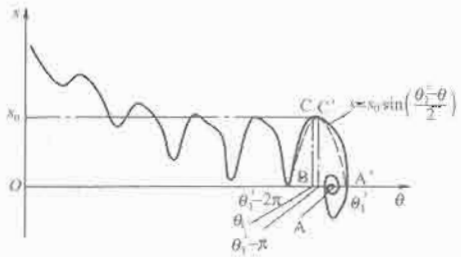


图 5.4-31　同步过程的转差率—转矩角曲线

$$s=s_0\sin\frac{\theta_1'-\theta}{2} \tag{5.4-47}$$

式中，s_0 为牵入同步前最后一个极差内的转差率最大值。分析临界同步过程中最后一个极差内的转差率—转矩角曲线可知，在 C 点和 A′点处电动机的加速度为零，即此时式（5.4-46）等式的两端均为零。C 点处的转差率最大，而 A′点处的转差率为零。

对式（5.4-46）右边关于 θ/p（机械角位移）从 C 点到 A′点的积分值，即电动机电磁转矩与负载转矩之差所提供的能量为

$$\frac{J}{2p^2}\omega_s^2 s_0^2 \tag{5.4-48}$$

而电动机加速至同步转速所需的视在动能为

$$A=\frac{J}{2}\Omega^2-\frac{J}{2}(\Omega-\Delta\Omega)^2=J\Omega\Delta\Omega$$

式中，$\Delta\Omega$ 为 C 点处的机械角速度与同步机械角速度间的差值。二者应相等，由此即可求出电动机能够牵入同步的最大转动惯量为

$$J=2\frac{p^2A}{\omega_s^2 s_0^2} \tag{5.4-49}$$

6.3.2　牵入同步能力的实用计算方法

对电动机牵入同步能力的要求，体现在当电动机拖动一定负载转矩时所能牵入同步的负载的最大转动惯量。不同的转矩，对应于所能牵入的不同的最大转动惯量，将之画成曲线，即为临界牵入同步 $J—T_L$ 曲线。计算电动机的牵入同步能力，也就是要计算电动机的临界牵入同步 $J—T_L$ 曲线。

有关文献介绍的牵入同步能力的计算方法比较复杂，下面介绍一种以计算机为基础的简单实用的永磁同步电动机牵入同步能力的计算方法。其过程如下：

根据电动机稳态性能计算方法，可以把电动机从 0 到 π 电弧度的整条矩角特性曲线求出。这样，给定电动机的一个负载转矩（含摩擦转矩）T_L'，便可求出对应的稳定工作点的转矩角 θ 和非稳定工作点处的转矩角 θ_1'，即图 5.4-31 中的 A 点和 A′点。

把式（5.4-47）和 $T_L=T_L'$ 代入 $T_{em}-T_L$，并令之为零，然后经过计算机迭代计算便可求出牵入同步最后一个极

差内的转差率最大值 s_0。

把式（5.4-43）代入式（5.4-46）的左边，其中的 s 以 $s \approx s_0 \sin[(\theta_1' - \theta)/2]$ 代替，对式（5.4-46）两边对 θ/p 从 $\theta_1' - \pi$ 到 θ_1' 积分，可得到积分后的等式

$$\int_{\theta_1'-\pi}^{\theta_1'} -\pi \frac{T_{em} - T_L'}{p} d\theta = A \qquad (5.4\text{-}50)$$

从式（5.4-49）即可求出电动机在负载转矩为 T_L' 时所能牵入同步的系统的最大转动惯量 J。

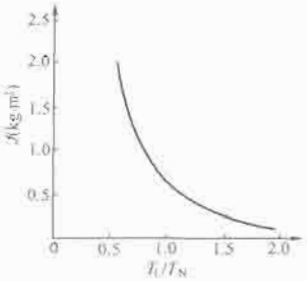


图 5.4-32 临界 J—T_L/T_N 曲线

继续给定不同的负载转矩，重复以上过程，便可求出电动机的临界转动惯量—负载转矩曲线（即 J—T_L 曲线）。图 5.4-32 即为用上述方法对某台异步起动永磁同步电动机进行计算所得的 J—T_L 曲线。图中，曲线左下侧为可以牵入同步的区域，右上侧为不能牵入同步的区域。

永磁体对电动机牵入同步能力有着复杂的影响。采用较多的永磁体或选用较高性能的永磁体意味着电动机的 E_0 会提高，E_0 的提高对电动机的牵入同步能力有着两方面的影响：一方面，导致电动机同步能量增加，牵入同步能力会提高；另一方面，永磁发电制动转矩增大，导致起动过程中的平均转矩变小，电动机牵入同步开始时的转差率 s_0 增大，从而使牵入同步能力下降。

对大容量电动机来说，因为电动机定子绕组电阻相对较小，平均发电制动转矩 T_g 达到最大值 T_{gmax} 时的转速接近零转速；而接近同步转速时，此制动转矩已很小，电动机总平均转矩下降不大，所以定子绕组电阻对牵入同步能力的影响不是很大。对小容量电动机来说，定子绕组电阻相对较大，使得平均发电制动转矩在接近同步转速时仍很大，从而使总平均转矩下降很大。

7 异步起动永磁同步电动机的设计特点

异步起动永磁同步电动机一般应用于要求高效的场合，因而对电动机的要求主要是效率高、功率因数高、起动品质因数（T_{st}/I_{st}）高和单位功率的永磁体用量省等。

7.1 主要尺寸和气隙长度的选择

异步起动永磁同步电动机的主要尺寸与普通电动机的一样，包括定子冲片内径 D_{i1} 和电枢计算长度 L_{ef}。一般来说，异步起动永磁同步电动机的设计可能有如下三种情况：

1）替代原来的感应电动机或原有性能较差的永磁同步电动机。在这种情况下，待设计的永磁同步电动机一般要求与原来电动机同中心高，故可在原来电动机主要尺寸基础上进行初步估算，然后再调整设计，直至电动机设计成功。

2）要求待设计的永磁同步电动机直接利用某特定的定子冲片，以提高电动机定子冲片的通用性和缩短电动机的研制周期。在这种情况下，由给定的定子冲片即可知道定子冲片内径，再由电动机的功率和电机常数选择电枢计算长度 L_{ef}。

3）仅给定电动机的性能指标，而无其他限制。此时选择电动机主要尺寸的自由度要比前两种情况大得多。根据预估的电磁负荷，由电动机的功率和转速可选定电动机的 D_{i1}^2 和 L_{ef}，然后凭经验选取一定的主要尺寸比 L_{ef}/τ_1，得出电动机的主要尺寸。一般来说，若无其他限制，电动机的主要尺寸比应选小一点，以便于在转子内部放置更多的永磁材料。

为减小杂散损耗、降低电动机的振动与噪声以及便于电动机的装配，气隙长度 δ 一般要比同规格感应电动机的气隙大。且电动机中心高越大，永磁同步电动机的气隙长度比感应电动机的气隙大得也越多。设计异步起动永磁同步电动机的气隙长度时，可参照相同规格或相近规格的感应电动机的气隙长度，并加以适当调整。

7.2 定、转子槽数的选择

异步起动永磁同步电动机的定子槽数选择原则与感应电动机的相同，而定、转子槽配合则与感应电动机稍有不同。为提高永磁同步电动机的制造工艺性和便于电动机极弧因数的控制（尤其是对采用内置径向式转子磁极结构的永磁同步电动机），电动机的转子槽数通常在定转子槽配合选用原则的容许范围内被选定为电动机极数的整数倍。

鉴于异步起动永磁同步电动机转子因有永磁体槽而不便斜槽，一般将电动机的定子叠片沿轴向扭斜一定距离以削弱谐波，减小电动机杂散损耗和附加转矩。具体所斜距离应根据需要消除的谐波次数来定。比如，有些电动机采用的斜槽距离

$$t_{sk} = \frac{Q_1 t_1}{Q_1 + p} \qquad (5.4\text{-}51)$$

式中，t_1 为定子齿距，m。

7.3 定、转子槽形选择

对于永磁同步电动机，定子槽形的选择同感应电动机，转子槽形结构同感应电动机笼型结构，只是由于考虑隔磁的效果，永磁同步电动机转子槽形的槽底选用平底槽，同时为保证隔磁效果，槽底宽度一般情况下要大于 3mm。

7.4 转子结构设计

异步起动永磁同步电动机可采用多种转子磁极结构，设计时应根据待设计电动机的具体性能指标按照本章第 2 节介绍的不同转子磁极结构的特点选用，或者研究、开发新的转子磁极结构。

永磁同步电动机的转轴尺寸可由电动机的转矩确定或参考同规格的感应电动机的转轴尺寸来确定。由于工艺上的原因，异步起动永磁同步电动机转子上永磁体槽与永磁体之间（磁化方向长度）留有一定的间隙，此间隙被称为第二气隙 δ_2，大小与电动机生产厂家的工艺水平有关，一般在 0.0001～0.0002m。进行直轴磁路计算时，第二气隙必须被考虑进去，即气隙磁位差（A/每对极）

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta (K_\delta \delta + \delta_2) \qquad (5.4\text{-}52)$$

而计算交轴磁路时，则不必考虑第二气隙。

7.5 永磁体设计

永磁体尺寸主要包括永磁体的轴向长度 L_M、磁化方向长度 h_M 和宽度 b_M。永磁体的轴向长度一般取与电动机铁心轴向长度相等或稍小于铁心轴向长度，因此实际只有两个永磁体尺寸（即 h_M 和 b_M）需设计。设计时，应考虑下列因素：

1）h_M 的确定应使电动机的直轴电抗 X_{ad} 合理。因为 h_M 是决定 X_{ad} 的一个重要因素，而 X_{ad} 又影响电动机的许多

性能。

2）h_M 不能过薄。这主要是从两方面考虑：一是 h_M 太薄将导致永磁体生产的废品率上升，永磁体成本提高，且使永磁体不易运输和装配；二是永磁体太薄将使其容易退磁。

3）设计 h_M 应使永磁体工作于最佳工作点。因为电动机中永磁体的工作点更大程度上取决于永磁体的磁化方向长度 h_M。

4）为调整电动机的性能，常常要调整 b_M，因为 b_M 直接决定了永磁体能够提供磁通的面积。当要求电动机磁负荷较高时，应选择能安装更多永磁体，也即能安装 b_M 更大的转子磁极结构。

永磁体尺寸除影响电动机的运行性能外，还影响着电动机中永磁体的空载漏磁因数 σ_0，从而也决定了永磁体的利用率。计算结果表明，永磁体尺寸越大，空载漏磁因数越小。经过一系列推导，可得内置径向式转子磁极结构永磁体尺寸的预估公式为

$$\begin{cases} h_M = \dfrac{K_s K_\Pi b_{m\delta}\delta}{(1-b_{m\delta})\sigma_0} \\ b_M = \dfrac{2\sigma_0 B_{\delta 1}\tau_1 L_{ef}}{\pi b_{m\delta} B_r K_\Phi L_M} \end{cases} \tag{5.4-53}$$

式中，K_s 为电动机饱和系数，其值为 1.05～1.3；K_Π 为与转子结构有关的系数，取值范围为 0.7～1.2。

对内置切向式转子磁路结构永磁体尺寸的预估公式为

$$\begin{cases} h_M = \dfrac{2K_s K_\Pi b_{m\delta}\delta}{(1-b_{m\delta})\sigma_0} \\ b_M = \dfrac{\sigma_0 B_{\delta 1}\tau_1 L_{ef}}{\pi b_{m\delta} B_r K_\Phi L_M} \end{cases} \tag{5.4-54}$$

除要求永磁体具有合适的尺寸公差外，还要求永磁体在使用前必须先进行老化处理和表面涂层处理，计算时所用的 B_r 和 H_c 应为材料老化处理后工作温度下的数值。

7.6　电枢绕组设计

异步起动永磁同步电动机的绕组设计与普通交流电动机的基本一样。永磁同步电动机由永磁体励磁，气隙磁场谐波较多，在设计高性能的电动机时，必须在绕组设计上采取一定的措施。异步起动永磁同步电动机通常采用 Y 联结的双层短距绕组以避免电动机绕组中产生环流，并削弱电动势谐波。

7.7　提高异步起动永磁同步电动机功率密度和起动性能的措施

由式（5.4-5）可以看出，E_0 与 X_d 决定着电动机电磁转矩中永磁转矩的幅值，从而也决定着失步转矩倍数。为提高永磁转矩以提高电动机的功率密度，应使 E_0 增大，X_d 减小。这可通过合理设计电动机的磁路，即适当加大电动机气隙长度和永磁体的磁化方向长度来实现。为提高永磁转矩而增大电动机绕组匝数以提高 E_0 的方法是不可取的，因为绕组匝数增大，虽使 E_0 提高，但 X_d 增大，实际上 E_0/X_d 减小，永磁转矩幅值下降。

式（5.4-5）中的磁阻转矩取决于交、直轴同步电抗 X_q 与 X_d 之差。X_d 与 X_q 相差越大，磁阻转矩幅值越大，电动机的功率密度和过载能力也有所提高。此外，较大的磁阻转矩还有利于电动机的牵入同步能力。但如两者相差过大，将使电动机输出额定转矩时转矩角过大，稳定性变差，并且电动机的振动与噪声也要变大。

异步起动永磁同步电动机起动过程中的 $T-n$ 特性曲线是考核设计性能的一个指标，从图 5.4-28 可以看出，过小的堵转转矩和最小转矩将使电动机不能起动或在低速爬行，而合成转矩的机械特性过软或永磁体发电制动转矩过大也将使电动机无法牵入同步转速。

一般来说，小容量电动机的牵入同步能力更难提高。这是因为小容量电动机的定子电阻相对较大，使得永磁发电制动转矩在接近同步转速时仍相当大，从而在牵入开始瞬间平均转矩的值较小，转差率较大，难以牵入同步。

选取永磁同步电动机转子电阻时，应注意到电动机的牵入同步能力与堵转转矩和最小转矩之间的矛盾，需要综合平衡选定。

7.8　提高异步起动永磁同步电动机效率和功率因数的措施

图 5.4-23 示出，当其他参数不变时，永磁同步电动机在给定负载下定子电流 I_1 与空载反电动势 E_0 的关系为一 V 形曲线，这说明 E_0 对电动机的功率因数影响很大。要提高电动机的功率因数，必须使电动机的 E_0 在一个合适的取值范围内。调节永磁体的尺寸，可使电动机的功率因数接近 1。若要使电动机具有超前功率因数，则需要多增加永磁体的用量。需要指出的是，电动机不同，功率因数与电动机 E_0 的关系曲线也不一样，而且电动机功率因数的大小还与电动机的其他参数（如 X_d、X_q 和 σ_0 等）有着密切的关系。

永磁同步电动机即使在轻载运行时功率因数和效率也较高，这是永磁同步电动机一个非常可贵的优点，图 5.4-33 为某台永磁同步电动机与同规格感应电动机效率和功率因数的比较曲线。

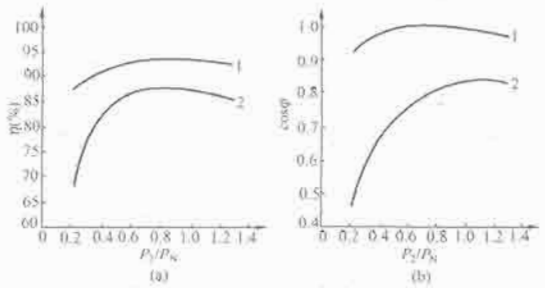


图 5.4-33　永磁同步电动机与感应电动机的效率和功率因数

（a）$\eta-(P_2/P_N)$ 曲线；（b）$\cos\varphi-(P_2/P_N)$ 曲线

1—永磁同步电动机；2—感应电动机

设计中可通过两个途径来提高 E_0，即增大绕组串联匝数和增加永磁体用量。前者只能在电动机堵转转矩、最小转矩、失步转矩和牵入同步能力有裕度的前提下才能进行，而后者则要考虑到不使电动机磁路过于饱和和制造成本不能过高。

永磁同步电动机具有较高的空载反电动势 E_0，不仅可提高稳定运行时的功率因数，还可使运行于冲击负载下的永磁同步电动机具有较强的稳定性、较高的平均功率因数和平均效率。

较高的功率因数还使定子电流变小、铜损耗下降、效率提高和温升降低，所以，设计高功率因数的永磁同步电动机是提高电动机效率的一条重要途径。

为减小永磁同步电动机的铁损耗，一般采用单位铁损耗较小的铁磁材料，并配合以气隙磁场波形优化设计，以减小谐波造成的附加铁损耗。

减小永磁同步电动机机械损耗的措施与设计其他种类电

机时所采取的措施类似，如提高电动机装配质量，采用合适的轴承和高效的润滑剂等。需要指出的是，由于永磁同步电动机力能指标较高，电动机损耗小，温升较低，因此可采用风量较小的风扇散热，这使电动机的机械损耗进一步减小。如果用于风机、泵类等负载，电动机可以单向旋转，因此可以设计轴流风扇来代替传统的盆式风扇，以进一步降低电动机的损耗，提高电动机的效率。

永磁同步电动机空载杂散损耗比同规格感应电动机的要大。这是因为前者永磁体产生的气隙磁场谐波含量比后者大。极弧因数（与定、转子槽配合、永磁体槽及隔磁措施有关）设计不合理时，气隙磁场谐波尤其大，会导致电动机的空载杂散损耗明显增大。选取合适的定、转子槽配合，采用Y联结双层短距绕组或正弦绕组，合理设计极弧因数，减小槽开口宽度或采用闭口槽等都是减小电动机空载杂散损耗的有效途径。

将定子斜一定的距离也可以降低永磁同步电动机的空载杂散损耗。定子斜槽不仅适用于异步起动永磁同步电动机，也适用于调速永磁同步电动机，不仅可减小电动机的空载杂散损耗，还可减小电动机的噪声和振动，提高电动机的运行平稳性。

适当加大气隙长度 δ 可在一定程度上减小电动机的空载杂散损耗。永磁同步电动机的气隙长度通常比同规格感应电动机的大，而且电动机容量越大，气隙大得越多。

定子采用闭口槽或采用磁性槽楔，可减小电动机齿磁导谐波导致的杂散损耗。但闭口槽使电动机漏磁因数和槽漏抗有所增大。

8 永磁交流伺服电动机的设计特点

变频电源供电的永磁同步电动机加上闭环控制系统构成自同步永磁电动机，其中驱动电流为矩形波，要求反电动势为矩形波的永磁同步电动机，称为方波驱动永磁无刷电动机，又常称为永磁无刷直流电动机，其设计特点请见本篇第6章。驱动电流为正弦波，要求反电动势也为正弦波的永磁同步电动机，称为正弦波驱动永磁无刷电动机，也常称为永磁交流伺服电动机。

永磁交流伺服电动机常见的功率范围为几十瓦到几十千瓦，甚至达到几兆瓦。调速范围不尽相同，高速时可达每分钟几万转，低速时仅为几十分钟一转。因此永磁交流伺服电动机根据用途不同，其设计要求及控制方式也不同。

8.1 主要尺寸选择

永磁交流伺服电动机（以下简称伺服电动机）的主要尺寸可以由所需的最大转矩和动态响应性能指标确定。

当伺服电动机最大电磁转矩指标为 T_{emmax}（N·m）时，则最大转矩与电磁负荷和电动机主要尺寸有如下关系

$$T_{emmax}=\frac{\sqrt{2}\pi}{4}B_{\delta 1}L_{ef}D_{i1}^{2}A \tag{5.4-55}$$

式中，$B_{\delta 1}$ 为气隙磁通密度基波幅值，T；A 为定子电负荷有效值，A/m。

$$A=\frac{mNI_1K_{dp}}{p\tau_1} \tag{5.4-56}$$

当选定电动机的电磁负荷后，电动机的主要尺寸

$$D_{i1}^{2}L_{ef}=\frac{4T_{emmax}}{\sqrt{2}\pi B_{\delta 1}A} \tag{5.4-57}$$

对永磁伺服电动机动态响应性能指标的要求体现为在最大电磁转矩作用下，电动机在时间 t_b 内可线性地由静止加速到转折速度（此时转折速度又称为基本转速）ω_b，即

$$T_{emmax}=\frac{J\Delta\omega}{p\Delta t}=\frac{J\omega_b}{pt_b} \tag{5.4-58}$$

式中，J 为电动机转子和负载的转动惯量，kg·m²。

电动机的最大电磁转矩与转动惯量之比

$$\frac{T_{emmax}}{J}=\frac{\omega_b}{pt_b} \tag{5.4-59}$$

而电动机转子的转动惯量可近似表示为

$$J=\frac{\pi}{2}\rho_{Fe}L_{ef}\left(\frac{D_{i1}}{2}\right)^{2} \tag{5.4-60}$$

式中，ρ_{Fe} 为转子材料的密度，kg/m³。

将式（5.4-55）和式（5.4-60）代入式（5.4-59），可得电动机的定子内径

$$D_{i1}=\sqrt{\frac{8\sqrt{2}pt_bB_{\delta 1}A}{\omega_b\rho_{Fe}}}\quad(\mathrm{m}) \tag{5.4-61}$$

由上式得到的 D_{i1} 即为在保证动态响应性能指标的前提下可选择的定子内径最大值。由式（5.4-57）和式（5.4-61）即可确定电动机的定子内径和铁心长度这两个主要尺寸。

内置式伺服电动机的气隙长度一般大于同规格感应电动机的气隙长度，且不同用途的电动机，其气隙长度的取值也不相同：对采用表面式转子磁极结构的伺服电动机，由于转子铁心上的瓦片形磁极需加以表面固定，其气隙长度不得不做得较大；对采用内置式转子磁极结构，要求具有一定的恒功率运行速度范围的伺服电动机，则电动机的气隙长度不宜太大。否则，将导致电动机的直轴电感过小，弱磁能力不足，电动机的最高转速无法达到。

确定电动机定子外径时，一般是在保证电动机足够散热能力的前提下，视具体情况为提高电动机效率而加大定子外径或为减小电动机制造成本而缩小定子外径。

8.2 反电动势常数和转矩常数

反电动势常数 k_e 及转矩常数 k_t 是永磁伺服电动机重要的设计参数，其中

$$k_e=\frac{E_{01}}{\Omega}=\frac{E_{01}\times 60}{n_N\times 2\pi} \tag{5.4-62}$$

式中，k_e 为反电动势常数，V·s/rad；E_{01} 为额定转速下空载线反电动势，V，当绕组为△联结时，$E_{01}=E_0$，当绕组为Y联结时，$E_{01}=\sqrt{3}E_0$，其中 $E_0=\frac{\sqrt{2}}{2}k_{dp}Np\Phi_{\delta 10}$；$n_N$ 为额定转速，r/min。

$$k_t=\frac{T_{em}}{I_1} \tag{5.4-63}$$

式中，k_t 为转矩常数，N·m/A；T_{em} 为电机电磁转矩，N·m；I_1 为电枢线电流，A。经推导，伺服电动机

$$k_t=\sqrt{3}k_e$$

这两个常数均与电动机绕组的匝数及永磁体的用量有关，电动机制作完成后，即为定值，不可改变。设计时要综合考虑各因素，设计在合理的范围内。

反电动势常数和转矩常数决定了驱动器的规格。在选配伺服电动机的驱动器时，根据反电动势常数计算出恒转矩运行曲线下最高转速对应的反电动势，驱动器的电压一定要高于反电动势值。并且根据转矩常数，计算出最大转矩下的电流值，选取的驱动器的电流一定高于这个电流。

8.3 机械时间常数和电气时间常数

动态响应快速性是伺服电机的重要指标，主要体现在机

械时间常数 τ_m 和电气时间常数 τ_e 等的设计上。

机械时间常数 τ_m 的定义：当电动机空载时电枢外施阶跃电压起动，其角速度（或转速）增速到 $0.632\Omega_N$ 时所需要的时间。它反映了电动机过渡过程的长短，即电动机转速跟随控制电压变化的快慢。

$$\tau_m = \frac{R_a J}{k_1 k_e} \tag{5.4-64}$$

式中，τ_m 为机械时间常数，s；R_a 为电枢电阻，Ω；J 为转动惯量，$kg \cdot m^2$。

机械时间常数与电机的转动惯量 J 的大小成正比，为了减小机械时间常数，宜采用细长形电枢或空心杯电枢，以获得尽量小的 J 值。机械时间常数还与电枢电阻 R_a 的大小成正比，为了减小电机的机械时间常数，应尽可能减小电枢电阻。

电气时间常数为

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \tag{5.4-65}$$

式中，τ_e 为电气时间常数，s；L_a 为电枢绕组电感，H。

由式（5.4-65）可知，电枢绕组电感 L_a 的大小直接影响到电气时间常数的大小，电感设计得越小，电气时间常数越小，反应速度越快。但同时需要考虑的是对于需要弱磁扩速的伺服电动机，电感越小，弱磁扩速能力越弱，因此在伺服电机的设计时要综合考虑电感设计的合理性。

由于电动机的过渡过程是电气的和机械的过渡过程交叠在一起的复杂过程，应由电动机的电气时间常数 τ_e 和机械时间常数 τ_m 两者所确定，称之为机电时间常数 τ_{me}。

热时间常数是反映电动机发热情况的，它指的是电动机在额定负载下，电动机绕组温度上升到稳定温升的 63.2%所需要的时间。由于温升的限制，设计电动机时常常把热时间常数作为一项重要的指标。而在分析电动机的动态或稳态性能时，由于热时间常数相对而言要大得多，一般不计热时间常数的影响。

8.4　定位力矩的抑制和低速平稳性的改善

8.4.1　定位力矩的抑制

高精度的调速传动系统通常要求系统具有较高的定位精度。影响伺服电动机停转时定位精度的主要原因是电动机的定位力矩，即电动机不通电时所呈现出的磁阻力矩，该力矩力图使电动机转子定位于某一位置。定位力矩主要是由转子中的永磁体与定子开槽的相互影响而产生的。

抑制定位力矩主要有以下几种措施：

1）永磁体的磁极宽度为整倍定子齿距。

2）减小定子槽开口或采用磁性槽楔。

3）使磁极产生的磁通呈正弦波。

4）提高铁心的加工精度。

5）保证永磁体的一致性和均匀性。

8.4.2　低速平稳性的改善

对现代高性能永磁交流伺服电动机最关键的是运行平稳性，而转矩波动的大小直接影响平稳性。转矩波动产生根源主要是由感应电动势或电流波形畸变而引起的纹波转矩和由齿槽或铁心磁阻变化引起的齿槽转矩。为产生恒定电磁转矩，反电动势及电流的波形必须是正弦的，但实际上，由于齿槽的存在及永磁体的形状等导致反电动势和电流的波形不完全是正弦的，含有许多谐波，产生纹波转矩引起转矩波动。在高速区，这个纹波有可能被转子惯量滤掉，但在低速区，它将使转子速度发生波动，会严重影响伺服驱动的性能，特别会使位置伺服精度和重复性变坏。应尽量减小电流和反电动势中的谐波幅值，特别是 5 次、7 次、11 次和 13 次这些低次谐波的幅值。在永磁交流伺服系统中，利用电流控制器可使定子电流尽可能逼近正弦。反电动势中的谐波分量与永磁体的磁场分布和定子绕组构成有关，因此可通过在绕组方面采取分布短距等措施，在转子磁极结构上采取相应措施以便减小反电动势中低次谐波的含量，最终减小纹波转矩，使转矩曲线更加平滑。齿槽转矩是由于齿槽的存在和定子铁心磁阻的变化而产生的磁阻转矩，可采取多种措施加以抑制。如将定子槽或永磁体斜一个齿距，一般可使齿槽转矩减小到额定转矩的 1%～2%或更小；减小槽开口尺寸或采用磁性槽楔，减小由于定子槽开口引起的气隙磁导变化的影响；选择合适的极弧宽度，可根据不同的电动机，通过电磁场分析计算选取最优的极弧因数，最佳极弧宽度可将齿槽转矩降为额定值的 1%，而最差极弧宽度却达到 25%；还可适当加大气隙等方法来减小齿槽转矩，从而减小转矩波动，提高低速运行的平稳性。

8.5　提高永磁同步电动机弱磁扩速能力的措施

$$\Omega_{max} = \frac{u_{lim}}{p(\Psi_f - L_d i_{lim})} \tag{5.4-66}$$

由式（5.4-66）可知，永磁交流伺服电动机“弱磁”运行时，在端电压达极限值、电流达额定值情况下，可以“弱磁”运行到任意高速的条件是

$$\Psi_f = L_d i_{lim} \tag{5.4-67}$$

即

$$e_0 = X_d i_{lim} \tag{5.4-68}$$

实际上，由于永磁伺服电动机直轴磁路上存在磁阻率很大的永磁体，使得电动机的直轴电感不可能做得很大，因此，式（5.4-68）的关系一般是达不到的。对实际的永磁伺服电机，一般

$$e_0 \gg X_d i_{lim} \tag{5.4-69}$$

由式（5.4-66）可看出提高永磁伺服电动机的最高转速可采取的主要方法：

1）减小 Ψ_f。

2）增大 i_{lim}。

3）增大 L_d。

4）提高电动机极限电压。

5）采用前四种方法的组合。

提高电动机的极限电压和极限电流势必要增大系统中逆变器的容量，从而提高了系统的制造成本。减小 Ψ_f 是对伺服电动机“弱磁”扩速的一条重要途径，但减小 Ψ_f“弱磁”扩速的同时，将使低速转矩变小，电动机的瞬态性能也将变差。且 Ψ_f 过小使转矩中永磁转矩分量降低，磁阻转矩（对凸极永磁伺服电动机）比例增大，不利于充分利用永磁体的磁能。增大 L_d，使之满足或接近式（5.4-67），是一条比较理想的“弱磁”扩速措施。

由电压极限方程可知，在定子电路内串接外电感，也可以起到扩速的功能，这实际上相当于从电路上人为地增大了电动机的直轴电感。

在要求弱磁扩速范围宽且高转速运行的永磁伺服电动机中，通常都采用内置式转子磁极结构而不采用表面式转子磁极结构，这主要是因为：

1）同样的永磁体磁化方向长度和气隙长度的前提下，内置式转子磁极结构的伺服电动机比表面凸出式电动机的直轴同步电感大，有利于恒功率运行速度范围的扩展。

2）内置式伺服电动机中的永磁体的抗不可逆退磁能力

比表面凸出式的大。

3）内置式伺服电动机的磁阻转矩可被充分利用，永磁磁链可设计得较低，从而使得电动机的"弱磁"扩速能力增大。

4）内置式电动机的转子机械强度更高，更适合于高速运转。

8.6 无铁心电动机

传统电机的磁场是由电流产生的，为了减少磁路的磁阻，都选用高磁导率的硅钢片叠压制成定、转子铁心，导致体积大、质量大（铁心重占总重的60%左右）、损耗大（铁心损耗占总损耗的20%～30%）、振动噪声大（铁心有齿有槽是产生电磁噪声的根源），难以满足高性能调速系统的要求。利用钕铁硼永磁高矫顽力的优异特性而不用或少用硅钢片，制成无铁心永磁伺服电动机，则电动机的质量大幅度下降，效率提高，振动噪声显著降低，同时具有更低的转动惯量、更快的响应速度、更宽的调速范围、更长的使用寿命。

8.6.1 无铁心电动机的分类

图5.4-34为无铁心电动机的基本结构示意图。根据有无齿槽及定转子是否为导磁材料，无铁心永磁交流伺服电动机可分成如下几种不同的类型：

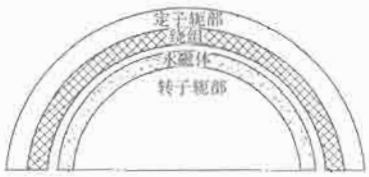


图5.4-34 无铁心永磁电动机的基本结构示意图

1）定子有齿槽，转子为非导磁材料。

2）定子无齿槽，转子为导磁材料。

3）定子无齿槽，转子为非导磁材料。

4）定子、转子均为非导磁材料。

根据磁场方向的不同可分为径向无铁心电动机及轴向无铁心电动机。

8.6.2 气隙磁通密度的提高

电动机改为无铁心后，定转子磁路的磁阻大大增加，气隙磁通密度将降低。为了使气隙磁通密度保持在适宜的值，需要采取提高气隙磁通密度的措施。

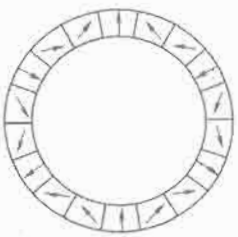


图5.4-35 聚磁型永磁体结构型式示意图

1）采用聚磁型永磁体结构型式（又称Halbach结构）。每极下有2～5块各向异性的永磁体，每块永磁体都具有特定的磁化方向，如图5.4-35所示。这种永磁体结构既可实现磁通密度按正弦规律分布，又可有效提高气隙磁通密度。常规永磁体结构，得到的气隙磁通密度波形接近梯形波，图5.4-36示出采用两种不同永磁体结构型式气隙磁通密度的分布情况。图5.4-37为两种永磁体结构厚度变化对气隙磁通密度的影响，在永磁体厚度较小时，相同面积的聚磁型永磁体结构的永磁体提供的气隙磁通密度和磁通较小；随着永磁体厚度的增大，聚磁型永磁体结构电动机所提供气隙磁通密度的增加量越来越高于常规永磁体结构的电动机，当永磁体厚度大于一定值时，聚磁型永磁体结构的电动机能够提供比常规永磁体结构更大的气隙磁通密度和磁通。因此为提高电动机的气隙磁通密度，从而提高电动机的转矩密度和功率密度，应该采用聚磁型永磁体结构。图5.4-38为定子和转子均无铁心且采用聚磁型永磁体结构的永磁伺服电动机磁场分布图。

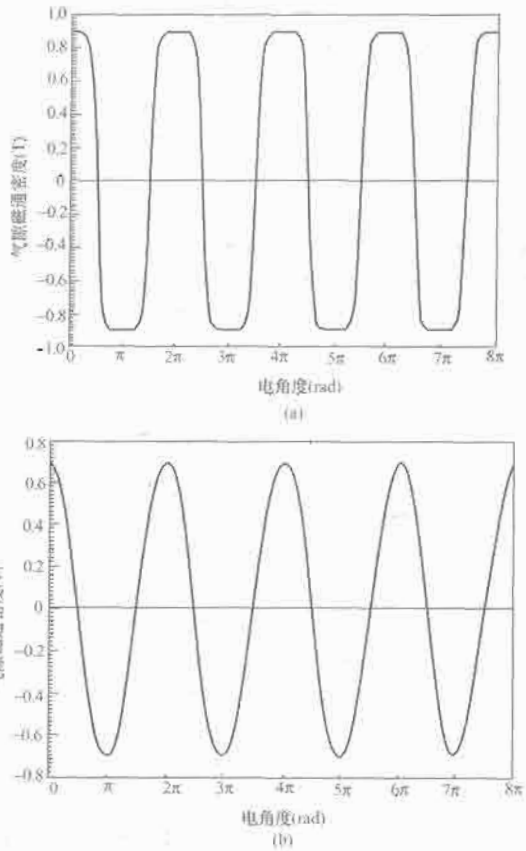


图5.4-36 气隙磁通密度波形
（a）常规永磁体结构；（b）聚磁型永磁体结构

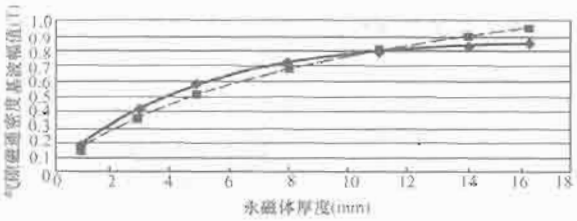


图5.4-37 两种永磁体结构厚度变化对气隙磁通密度的影响
- - - Halbach永磁体结构；——常规永磁体结构

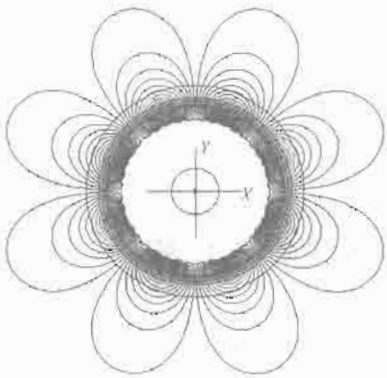


图5.4-38 磁场分布图

2）采用高矫顽力的永磁材料并适当增加永磁材料用量。

3）提高加工精度，尽可能减小气隙长度和绕组所占径向尺寸。

实践表明，采用无齿槽结构或者采用聚磁结构且转子采用非导磁材料后，气隙磁通密度都可保持在适宜值，电动机质量可以大大减轻而体积基本不变。如果转子都为无铁心，需要显著增加永磁材料用量，电动机体积也随着增大。

8.6.3　制造工艺特点

传统电动机定子采用硅钢片叠压而成，硅钢片具有齿和槽，线圈置于槽内，其数量和位置均由槽形来确定；无铁心电动机的无齿槽结构使线圈绕制和定位均存在较大的困难，需要研究线圈绕制工艺并研制相应的工装模具。在制作线圈时，首先需要根据电磁设计方案确定导线规格、跨距等基本参数，主要工艺路线是：平行线圈三相平绕——平行线圈搓扁压制——片状线圈卷压成筒形。单匝平行线圈绕制成以后，按匝进行必要的捆绑，将数个分别捆绑好的单匝平行线圈放到搓扁模型中，进行搓扁。线圈搓扁工艺如图 5.4-39 所示。

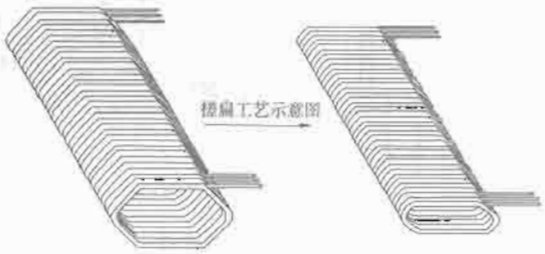


图 5.4-39　线圈搓扁工艺图

为了满足筒形线圈卷压工艺的要求，需使用筒形线圈成型模具，如图 5.4-40 和图 5.4-41 所示。在图 5.4-40 所示的筒形线圈卷压外胀模具用于支撑绕组，其外径和设计的绕组内径的尺寸相同，并且最终沿圆周方向平均分割成若干片，将每一片进行切割使之变窄，加工完成后再拼成圆环，用两个弹簧圈固定，然后放到已经制作好的绕组圆环里面。图 5.4-41 所示的筒形线圈卷压内胀模具与外胀模具是按同一尺寸加工的两个模具，它的左侧用于绕组端部的成型。

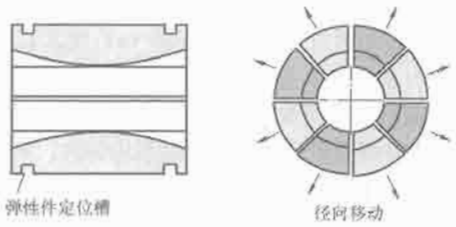


图 5.4-40　筒形线圈卷压外胀模具图

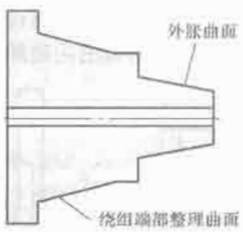


图 5.4-41　筒形线圈卷压内胀模具图

筒形线圈卷压时，将电动机壳体内表面均匀涂抹一层黏结剂，将外胀模具的内外圆表面涂抹上脱模剂后，再将片状线圈按要求摆放在电动机壳体内表面和外胀模具外圆之间，然后将内胀模具压入外胀模具，待内胀模具压入到指定位置，然后浸漆浇注环氧树脂，烘干后取出内胀模具和外胀模具，筒形线圈便卷压成型，卷压过程如图 5.4-42 所示。

永磁体的拼装过程也较复杂，由于采用聚磁型永磁体阵列，永磁体块数较多，而且相邻永磁体的磁化方向不同，磁体块之间存在相互作用力，磁体的安装定位比较困难，需制作专门永磁体装配工装如图 5.4-43 所示。该聚磁型阵列转子永磁体工装采用了快开螺栓压紧方式，大大减少了压紧和松脱时间，装配过程如图 5.4-44 所示。

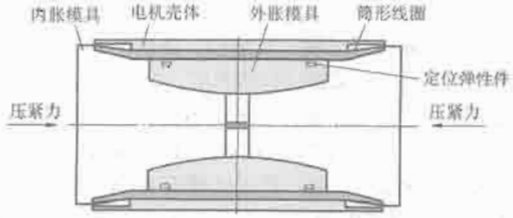


图 5.4-42　筒形线圈卷压过程示意图

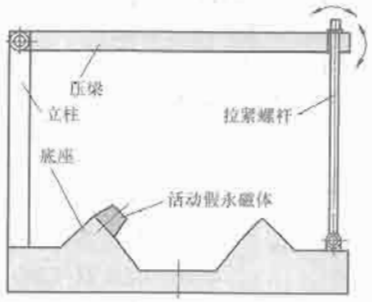


图 5.4-43　聚磁型永磁转子工装图

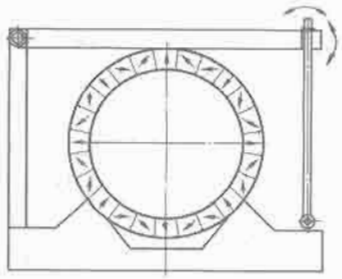


图 5.4-44　聚磁型永磁转子装配图

9　盘式永磁电动机的设计特点

9.1　盘式永磁同步电动机结构和特点

盘式永磁电动机由于其外形扁平、轴向尺寸短而特别适用于安装空间有严格限制的场合。盘式永磁电动机的气隙是平面型的，气隙磁场是轴向的，所以又称为轴向磁场电动机。

盘式永磁同步电动机的典型结构如图 5.4-45 所示，其定、转子均为圆盘形，在电动机中对等放置，产生轴向的气

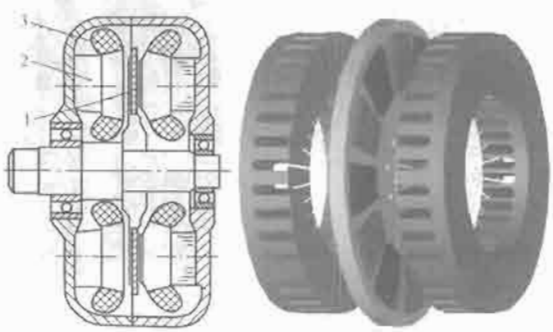


图 5.4-45　盘式永磁同步电动机（内转子结构）
1—转子；2—定子铁心；3—定子绕组

隙磁场。定子铁心一般由双面绝缘的冷轧硅钢片带料冲制卷绕而成，定子绕组有效导体在空间呈径向分布。转子为高磁能积的永磁体和强化纤维树脂灌封而成的薄圆盘。盘式定子铁心的加工是这种电动机的制造关键。近年来，采用钢带卷绕的冲卷机床来制造盘式永磁电动机铁心既节省材料，又简化工艺。

这种电动机轴向尺寸短、质量轻、体积小、结构紧凑。由于励磁系统无损耗，电动机运行效率高。由于定转子对等排列，定子绕组具有良好的散热条件，可获得很高的功率密度。转子的转动惯量小，机电时间常数小，峰值转矩和堵转转矩高，转矩质量比大，低速运行平稳，具有优越的动态性能。

以盘式永磁同步电动机为执行元件的伺服传动系统是新一代机电一体化组件，具有不用齿轮、精度高、响应快、加速度大、转矩波动小、过载能力强等优点，应用于数控机床、机器人、雷达跟踪等高精度系统中。

盘式永磁同步电动机有许多结构型式，按照定转子数量和相对位置可大致分为以下四种：

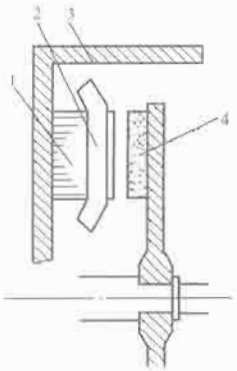


图 5.4-46 单定子、单转子结构

1—定子铁心；2—定子绕组；3—机座；4—永磁体

1）中间转子结构（内转子结构）。这种结构（见图 5.4-45）可使电动机获得最小的转动惯量和最优的散热条件。它由双定子和单转子组成双气隙，其定子铁心分为齿槽和无齿槽两种。有齿槽定子加工时采用专用的冲卷床，使铁心的冲槽和卷绕一次成型，既提高了硅钢片的利用率，又可降低电机损耗。

2）单定子、单转子结构。这种结构（见图 5.4-46）最为简单，但由于其定子同时作为旋转磁极的磁回路，需要推力轴承以保证转子不致发生轴向窜动。而且转子磁场在定子中交变，会引起损耗，导致电动机的效率降低。

3）中间定子结构（外转子结构）。由双转子和单定子组成双气隙，如图 5.4-47 所示。定子铁心一般不开槽，定子绕组既可以黏结在铁心上，也可以均匀环绕于铁心上，形成环形绕组定子。转子为高性能永磁材料黏结在实心钢构成的圆盘上，如图 5.4-48 所示，所以这种电动机的转动惯量比中间转子结构的要大。

4）多盘式结构。由多定子和多转子交替排列组成多气隙，如图 5.4-49 所示。采用多盘式结构可进一步提高盘式永磁同步电动机转矩，特别适合于大转矩直接传动装置。

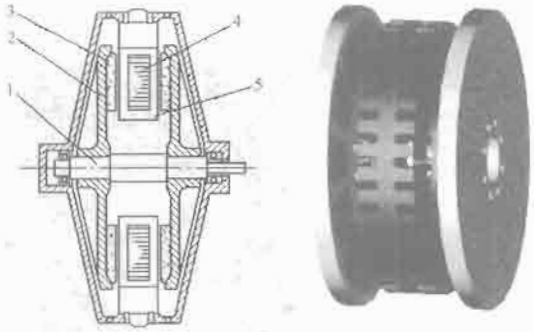


图 5.4-47 中间定子结构

1—轴；2—转子轭；3—永磁体；4—定子铁心；5—定子绕组

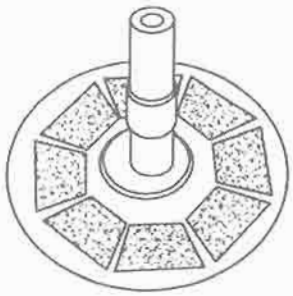


图 5.4-48 盘式转子

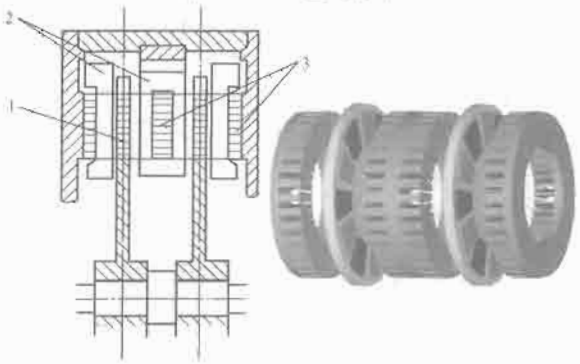


图 5.4-49 多盘式结构

1—转子；2—定子绕组；3—定子铁心

9.2 磁场分布和计算

大多数盘式永磁电动机采用无槽结构，气隙较大，电枢反应作用较弱，通常可以忽略不计。只有当功率密度较高时，才考虑电枢反应的去磁效应。盘式永磁电动机的空载磁场分析对这类结构电动机的设计十分重要。本节以单边永磁体结构的盘式永磁电动机为例进行分析。

9.2.1 主磁路结构

盘式永磁同步电动机磁场分布比较复杂。仅就主磁路而言，主磁通同时经由两条磁路闭合，一条磁路的磁通经过气隙、磁轭和端盖而闭合，如图 5.4-50（a）所示；另一条磁路的磁通从 N 极出发，经过气隙、定子磁轭、再经过气隙到达 S 极，最后经转子轭部闭合，如图 5.4-50（b）所示。由于电动机中各部分磁通密度分布是不均匀的，不同半径处的磁路长度也不相同，这就使这种电动机的磁路计算比径向式电动机的复杂。而主磁通在磁轭中的特殊分布，更增加了磁路计算的难度。但由于盘式永磁电动机气隙较长，主磁路一般不饱和，对于工程设计可取平均直径处如图 5.4-50（b）所示的磁路作为盘式永磁电动机的主磁路进行分析。

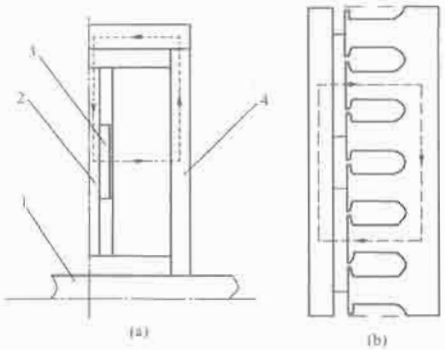


图 5.4-50 盘式永磁同步电动机主磁路示意图

（a）径向截面；（b）周向展开

1—轴；2—转子；3—永磁体；4—端盖

9.2.2　空载工作点确定

假定磁路不饱和，铁心中的磁位差可以忽略，同时忽略电枢反应，则

$$H_\delta \delta = H_m h_M \tag{5.4-70}$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \tag{5.4-71}$$

式中，δ 为电动机的总气隙长度，m；δ_1 为电机主气隙长度，也叫第一气隙，m；δ_2 为永磁体与转子之间黏结间隙长度，称为第二气隙，其大小主要取决于磁极的黏结工艺，一般为 0.0003～0.0005m；h_M 永磁体磁化方向的长度，m；H_δ、H_m 分别为气隙和永磁体的磁场强度，A/m。

同径向式电动机，盘式永磁电动机主磁极产生的总磁通 Φ_m 也分为主磁通 Φ_δ 和漏磁通两部分，其漏磁因数

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_\delta} = \frac{\Phi_\delta + \Phi_\sigma}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_\delta} \tag{5.4-72}$$

根据磁通连续性原理可得

$$B_\delta = \frac{B_m A_m}{\sigma A_\delta} \tag{5.4-73}$$

式中，A_δ 为每极气隙有效面积，m^2；B_δ 为气隙磁通密度，T；B_m 为永磁体工作点磁通密度，T；A_m 为永磁体提供每极磁通的面积，m^2。

设电动机极对数为 p，永磁体内、外径分别为 D_{mi}（m）和 D_{mo}（m），极弧因数和计算极弧因数分别为 α_p、α_i，则

$$A_m = \frac{1}{8p}\pi\alpha_p (D_{mo}^2 - D_{mi}^2) \tag{5.4-74}$$

$$A_\delta = \frac{1}{8p}\pi K_F \alpha_i (D_{mo}^2 - D_{mi}^2) \tag{5.4-75}$$

式中，K_F 为气隙磁通密度分布因数，定义为气隙磁通密度沿圆周分布曲线所对应的幅值随半径变化曲线的平均值与最大值之比，它同时考虑了气隙磁通密度的三维分布、边缘效应和电枢绕组端部伸长对气隙磁通密度幅值的影响。

根据式（5.4-72）～式（5.4-74）和式（5.4-69），且 $B_\delta = \mu_0 H_\delta$，$\alpha_i \approx \alpha_p$，可以确定永磁体工作点磁通密度 B_m 和相应气隙磁通密度为

$$B_m = \frac{\sigma K_F B_r}{\sigma K_F + \mu_r \dfrac{\delta}{h_M}} \tag{5.4-76}$$

$$B_\delta = \frac{B_r}{\sigma K_F + \mu_r \dfrac{\delta}{h_M}} \tag{5.4-77}$$

9.2.3　三维磁场分析

盘式永磁电动机磁场的实际分布比较复杂，为了精确计算磁场分布，需要进行三维磁场计算。通过三维磁场计算还可以求出漏磁因数、气隙磁通密度分布因数和计算极弧因数等主要参数。

盘式永磁同步电动机的空载磁场是静磁场，可用标量位进行计算。用等效磁荷模拟永磁体效应，取一个极的范围为求解区，如图 5.4-51 所示。选用钕铁硼永磁材料，对不同极数和磁极尺寸，在不同气隙长度 δ，不同永磁体磁化方向长度 h_M 和不同极弧因数 α_p 条件下进行计算，计算结果如图 5.4-52～图 5.4-56 所示。

磁场计算结果表明：

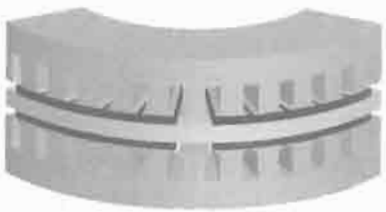


图 5.4-51　求解区域示意图

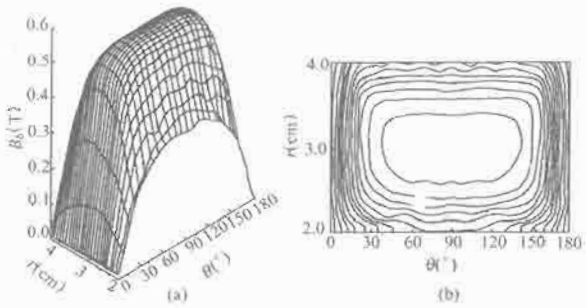


图 5.4-52　气隙磁通密度的空间分布图
（a）空间分布；（b）磁通密度等效线

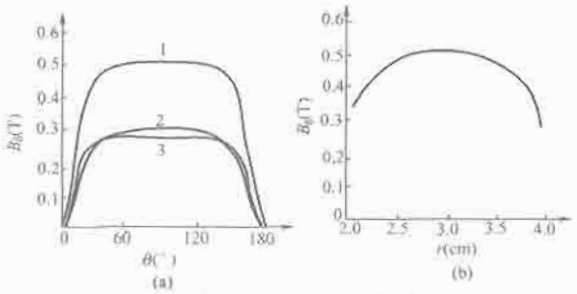


图 5.4-53　气隙磁通密度分布曲线
（a）不同半径处气隙磁通密度沿周围的分布；
（b）气隙磁通密度幅值随半径变化
1—平均半径处；2—内径处；3—外径处

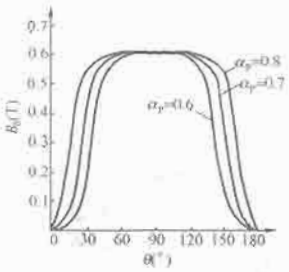


图 5.4-54　平均半径处不同极弧因数下气隙磁通密度

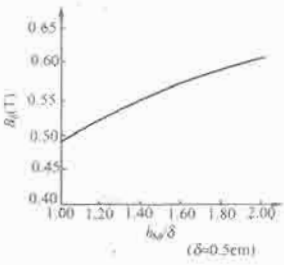


图 5.4-55　平均半径处气隙磁通密度幅值变化

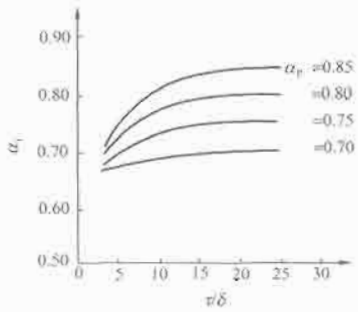


图 5.4-56　计算极弧因数 α_i

1）气隙磁通密度的分布与半径 r 有关，在某一半径处气隙磁通密度的分布基本为平顶波，在平均半径附近气隙磁通密度幅值最大，而在靠近内、外径处，由于受到边缘效应的影响，气隙磁通密度的幅值下降（见图 5.4-52 和图5.4-53）。

2）如用平均半径处气隙磁通密度来代替实际的气隙磁通密度，需要引入气隙磁通密度分布因数 K_F 以保证每极磁通量不变。从气隙磁通密度幅值变化曲线上看，气隙磁通密

度分布因数小于1，一般在0.85～0.98之间。

3）气隙磁通密度最大值 B_δ 基本与极弧因数 α_p 无关（见图5.4-54），而主要决定于永磁体磁化方向长度和气隙长度之比（见图5.4-55）。

4）计算极弧因数 α_i 受永磁体磁化方向长度与气隙长度之比的影响不大，主要决定于极距与气隙长度之比 τ/δ。当 τ/δ 较小时，计算极弧因数小于极弧因数；随着 τ/δ 增大，计算极弧因数逐渐增大，直至等于极弧因数（见图5.4-56）。

5）通过分析铁磁材料中的磁通密度分布可知，盘式永磁电动机磁路基本不饱和。所以在进行磁路分析时，不考虑铁磁材料的饱和影响而带来的误差，在工程上是可行的。

9.2.4 空载漏磁因数计算

空载漏磁因数的计算，对于确定永磁体工作点、准确进行磁路计算有重要作用。可以通过三维电磁场有限元方法求出盘式永磁电动机的空载漏磁因数及其变化规律。

在进行磁场分析时，取图5.4-51所示一个极的结构为研究对象。图5.4-57和图5.4-58为相应的磁矢位分布和磁通密度分布。相应地，其空载漏磁因数也可按式（5.4-72）求出。



图5.4-57 盘式永磁同步电动机三维磁矢位分布

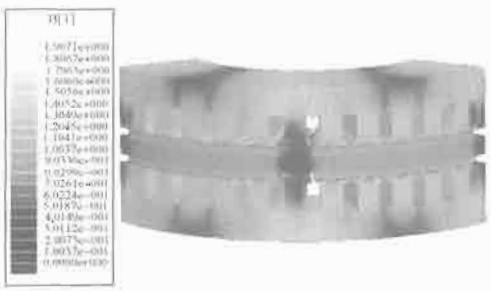


图5.4-58 盘式永磁同步电动机磁通密度分布

9.2.5 气隙磁通密度分布因数

气隙磁通密度分布因数表示了盘式永磁电动机气隙磁通密度幅值随半径的变化关系，同时还考虑了边缘效应的影响，它主要与永磁体的径向长度 l_r、永磁体磁化方向长度 h_M 及气隙长度 δ 有关。通过计算，图5.4-59（a）～（c）示出了某种情况下气隙磁通密度分布因数的值 K_F，供参考。

9.3 主要尺寸

盘式永磁同步电动机的电动势、电磁转矩公式与普通径向式电动机的一致，说明盘式永磁同步电动机的电磁本质未变，只是结构改变而已。

由于盘式永磁同步电动机电枢绕组的有效导体在空间呈径向辐射，电动机的线负荷随考察处的直径变化而变化。如果考虑平均直径处电动机的线负荷 A_{av}，可以得到盘式永磁同步电动机的平均电磁功率为

$$P_{em}=EI=\frac{\pi^2}{480}nB_{\delta av}A_{av}(D_{mo}^2-D_{mi}^2)(D_{mo}+D_{mi}) \tag{5.4-78}$$

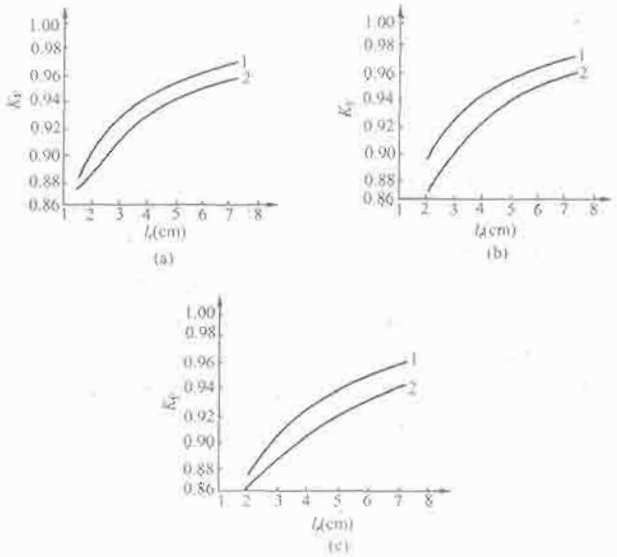


图5.4-59 气隙磁通密度分布因数 K_F

（a）δ=0.3cm；（b）δ=0.4cm；（c）δ=0.5cm

1— $h_M/\delta=1$；2— $h_M/\delta=2$

可利用下式来考核电动机最小直径处的线负荷

$$A_{max}=P_{em}\frac{240}{\pi^2 nB_{\delta av}(D_{mo}^2-D_{mi}^2)D_{mi}} \tag{5.4-79}$$

将式（5.4-79）改写，并考虑到长度的单位用m，A 的单位用A/m，可以得到与普通径向式电动机相似的主要尺寸计算公式

$$\frac{D_{\delta av}^2 L_{ef}n}{P_{em}}=\frac{60}{\pi^2 B_{\delta av}A_{av}}=\frac{6.1}{B_{\delta av}A_{av}} \tag{5.4-80}$$

根据式（5.4-79），可得到盘式永磁同步电动机单位体积的功率（W/m³）

$$\frac{P_{em}}{V}=\frac{P_{em}}{\pi D_{av}L_{ef}\sum h}=\frac{\pi}{120}nB_{\delta av}A_{av}\left(\frac{D_{av}}{\sum h}\right) \tag{5.4-81}$$

式中，D_{av} 为电枢的平均直径，m，$D_{av}=(D_{mo}+D_{mi})/2$；L_{ef} 为电枢绕组导体的有效长度，m，$L_{ef}=(D_{mo}-D_{mi})/2$；$\sum h$ 为电动机轴向总长度，m。

可见，盘式永磁同步电动机单位体积的功率与电枢平均直径成正比而与总的轴向长度成反比，这与普通径向式电动机是不同的。

盘式永磁同步电动机的主要尺寸比

$$\frac{L_{ef}}{D_{av}}=\frac{D_{mo}-D_{mi}}{D_{mo}+D_{mi}}=\frac{\gamma-1}{\gamma+1} \tag{5.4-82}$$

式中，$\gamma=D_{mo}/D_{mi}$ 为盘式永磁同步电动机磁极的外径与内径比，近似为电枢外径与内径之比，称为电枢直径比，它是盘式永磁同步电动机初始设计时的一个重要参数。

设计盘式永磁同步电动机时，其外形尺寸需满足安装要求。当外径给定时，可以通过确定最佳的直径比获得最大的输出功率。由于盘式永磁同步电动机绕组在内径处导线密集，线负荷最大，如果此处线负荷过高，会引起电枢绕组局部过热。所以，应根据内径处线负荷不超过允许值进行初始设计。将式（5.4-79）对功率求极值，可以得到

$$\gamma=\frac{D_{mo}}{D_{mi}}=\sqrt{3} \tag{5.4-83}$$

即若外径 D_{mo} 和最大线负荷 A_{max} 一定，盘式永磁同步电动机的电枢直径比为$\sqrt{3}$时可获得最大输出功率。在实际设计时，直径比的确定还应综合考虑用铜量、效率、漏磁等因素。若要产生一定电动势，γ 值越大所需的匝数就越小，

从而减少端部用铜量。然而，内径过小会增加导线安放的困难，同时 γ 增大还会引起漏磁增加。一般地，盘式永磁同步电动机的直径比在 1.5～2.2 之间，容量较小时取 1.5～1.73；容量较大时取 1.7～2.2。

9.4　磁极设计

（1）极数和极弧因数 α_p

对于一定的极弧因数，采用较少的极数使极间距离增加，漏磁显著减小。但是极数太少势必会对电动机的效率带来不利的影响。因盘式永磁同步电动机一般采用波绕组，其支路数与极数无关，对于一定的电枢导体数，极数少的电动机其端接部分较长，致使用铜量增加，电枢绕组铜损耗增大和效率降低。所以尽管盘式永磁同步电动机漏磁很大，但为了有较高的效率，仍然采用较多的极数，一般为 6～12 极。

减小极弧因数有利于减少漏磁，但会引起每极磁通量降低，而磁通的降低又会导致匝数增加和气隙增大，一般情况下选取 0.8 左右为最佳。

（2）磁极尺寸的确定

在电枢内、外径确定之后，磁极内、外径随即确定，关键的问题是如何选择永磁体的厚度。通过近似分析可以得出在理想情况下，永磁体最经济的尺寸是永磁体厚度近似等于气隙长度。但是，这时气隙磁通密度 $B_\delta \approx B_r/2$，如果永磁体的剩余磁感应强度不是很高，对于电动机设计并不有利。为了提高气隙磁通密度，不得不增加永磁体厚度。通常对于铁氧体永磁，永磁体厚度 $h_M = (3 \sim 6)\delta$；对于钕铁硼永磁，$h_M = (1 \sim 2)\delta$。

10　横向磁通永磁电动机的设计特点

10.1　原理与特点

横向磁通永磁电动机是相对于常规的径向磁通和轴向磁通电动机而言的。常规结构电动机［径向磁通电动机见图 5.4-60（a）］中，磁力线所在平面平行于电动机的旋转方向。但在横向磁通永磁电动机［见图 5.4-60（b）］中，单根磁力线处于三维分布，定子铁心中的磁力线所在平面垂直于电动机的旋转方向，而经过气隙到达转子后的磁力线的走向与常规电动机相同。为清晰表示，选 Y 轴与铁心的某个中心线重合，电动机的旋转方向 ω 在 XY 平面，而在 C 型定子铁心中，磁力线在 ZY 平面上、转速 ω 垂直于 ZY 平面。在电动机直径一定时，常规电动机的定子齿宽和槽宽之和是一个常数，即电动机的线负荷所占空间与磁负荷所占空间相互制约；而横向磁通永磁电动机的定子铁心尺寸和线圈尺寸相互独立，即线负荷所占空间与磁负荷所占空间相互解耦，就可以大大提高电动机的转矩密度。

横向磁通永磁电动机与常规结构电动机比较，有以下优点：

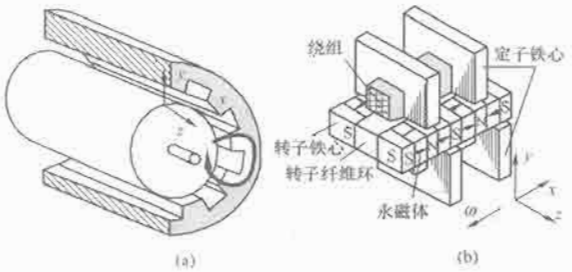


图 5.4-60　常规径向磁通电动机与横向磁通永磁电动机的磁路对比图

（a）常规径向磁通电动机；（b）横向磁通永磁电动机

1）定子各相是相互独立的，各相之间没有耦合，便于设计为多相结构，具有良好的控制特性。

2）它的许多参数是独立的，可以任意选择，如该电动机的定子铁心结构和电枢线圈在空间位置上相互垂直，因而定子尺寸和通电线圈的大小相互独立，设计自由，可根据需要调整磁路尺寸，选择线圈的规格和匝数。

3）比常规电机的转矩密度大。体积小，重量轻，效率高。

这些优点的存在，使得横向磁通永磁电动机适合于大转矩、低转速、大功率的工业领域及军事领域等，如风力发电、电动车、磁悬浮列车和舰船电力推动用的兆瓦级驱动电机。

然而，横向磁通电机同时也存在一些缺点，主要表现在以下几个方面：

1）由于电动机磁路是三维的，电动机中除有径向磁场外，还有横向（轴向）磁场，其电动机制造工艺较复杂，自动化程度较低。

2）电动机功率因数较低，一般为 0.3～0.5。

3）由于横向磁通永磁电动机的极数多，电动机的机械强度低。

10.2　基本类型及结构特点

根据永磁体安放位置的不同，横向磁通永磁电动机磁极结构也可分为表面式、切向式和混合式。表面式磁极结构，永磁体直接黏贴在转子表面，简单方便，但气隙磁通密度低，主要应用于单边布局的电动机。切向式磁极结构［见图 5.4-61（a）］具有较高的气隙磁通密度，但结构比较复杂，转子漏磁增加。混合式磁极结构［见图 5.4-61（b）］有更好的聚磁效果，漏磁少，但结构工艺更复杂。

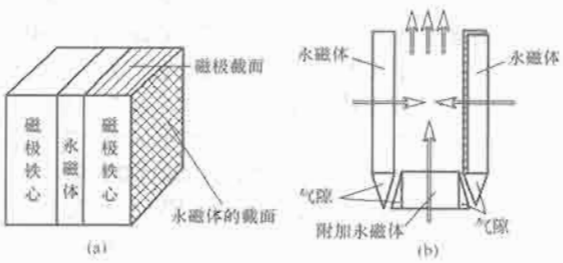


图 5.4-61　转子磁极结构

（a）切向式磁极结构；（b）混合式磁极结构

根据定转子的拓扑结构，横向磁通永磁电动机可分为单边布局和双边布局两种类型。

单边布局：仅在转子径向一侧布置定子极片，定转子间只有一个气隙。图 5.4-62 为 C 形定子铁心、I 形定子磁桥的单边横向磁通永磁电动机拓扑结构；图 5.4-63 为爪极式

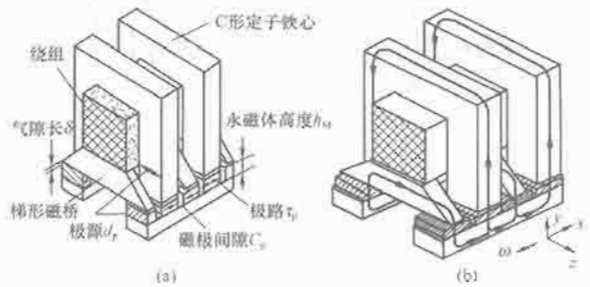


图 5.4-62　单边横向磁通永磁电动机（C 形定子铁心）

（a）结构；（b）磁路

定子铁心的单边横向磁通永磁电动机拓扑结构与磁路。

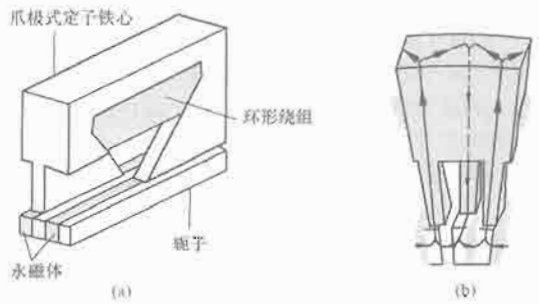


图 4-63 单边横向磁通永磁电动机（爪极式定子铁心）
(a) 结构；(b) 磁路

单边布局横向磁通永磁电动机的定子铁心有U形、C形、E形和爪极形。相对于最原始的U形定子铁心，C形、爪极形结构简单。E形结构在极数较少的横向磁通电动机上采用。当然，这里的定子铁心既可用于单边布局的电动机，也可用于双边布局的电动机。

定子铁心可以由铁粉心组成，因黏合剂的绝缘作用，在高频时它的涡流损耗很小，电动机的体积小、质量轻；缺点是磁滞损耗大，磁导率低，当电动机功率密度高时它的机械强度较低。

为了减少磁通脉动并使涡流损耗最小，单边布局电动机可以采用定子磁桥。定子磁桥可以是I形，也可以是梯形，后者可以减少磁桥与定子铁心之间的漏磁。

单边布局横向磁通电动机结构简单，易于制造。但是转矩密度与功率因数都比双边布局低。这种电动机可以做成轴向多相电动机或者同圆周多相电动机，以提高转矩密度与功率因数，应用较多的是电角度互差120°的三相横向磁通电动机。

双边布局：在转子径向两侧都布置有定子极片。图5.4-64（a）为德国H. Weh教授提出的横向磁通永磁电动机原型机两相的部分结构示意图。该原型机为双定子结构，上下两层沿圆周均匀分布的U形铁心构成双定子铁心，上下定子铁心之间互错半个定子极距，两个环形的集中绕组分别放置于定子铁心的凹槽中。转子由扇形铁心片和稀土永磁体叠装而成。

由于图5.4-64（a）所示的双边TFM结构复杂，难以适应多相电动机，故出现了图5.4-64（b）所示的改进型，即将图5.4-64（a）所示的U形叠层定子铁心旋转90°方位，并改变形状能使磁通从同一个转子轮缘的相邻磁体间穿过，为了减少磁通在铁心中的畸变，以减少铁损耗，并简化电动机的工艺，铁心形状改变为C形。

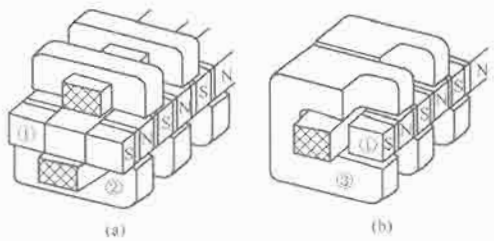


图 5.4-64 双边布局横向磁通电动机
说明：▭ 定子绕组环 ①转子软铁
▭ 转子纤组环 ②定子U形铁心
③定子C形铁心

总之，这种电机结构复杂，工艺性较差，但是转矩密度与功率因数较单边布局有显著提高，做成多相时，适用于兆瓦级的大功率电动机。

三相横向磁通电动机又分为三相同轴排列与三相同圆周排列。前者电动机中的三相可以看作单独的单相电动机，由轴机械串联而成；后者三相共用转子。

10.3 典型结构的磁场分布和计算

横向磁通永磁电动机的结构复杂，内部磁场呈三维分布，在转子和定子铁心的齿部，磁通沿径向平面流通，而定子铁心轭部的磁通沿轴向流通，流通方向相互垂直，难以简化为二维平面。因此必须进行三维电磁场分析计算。下面以一种典型结构（见图5.4-65）的横向磁通永磁电动机为例，通过三维电磁场计算，得到电动机主要部件表面的磁通密度的三维分量，进而求出垂直于各个表面的磁通分量，即进入（或流出）各表面的磁通，由此可计算得空载漏磁因数。

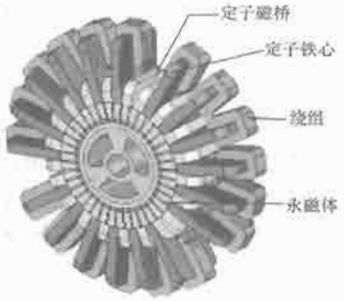


图 5.4-65 初步的电动机结构示意图

图5.4-66、图5.4-67分别示出了一台40极电动机的定子轭部磁通密度和空载电动势随转子角位移的变化曲线。

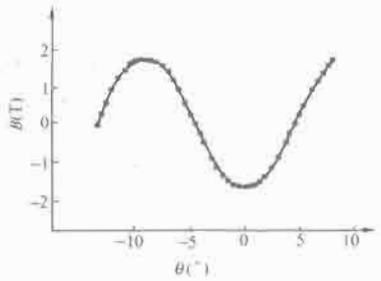


图 5.4-66 定子轭部磁通密度随转子角位移的变化曲线

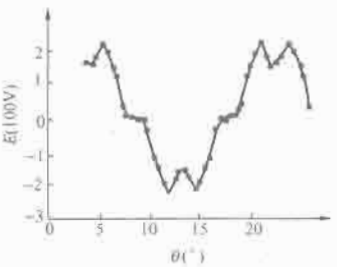


图 5.4-67 空载反电动势随转子角位移的变化曲线

图5.4-68和图5.4-69给出了电动机转子在直轴和交轴位置电动机绕组通以不同电流情况下，绕组电抗与电流的关系，其中电源频率为50Hz。

10.4 功率因数问题

横向磁通电动机在电气性能上仍可采用同步电动机的相

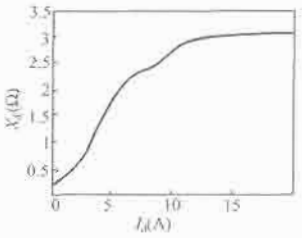


图 5.4-68　$X_d = f(I_d)$

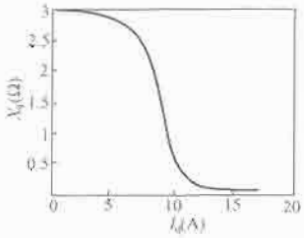


图 5.4-69　$X_q = f(I_q)$

量图来表示其各电磁参数之间的关系，如图 5.4-70 所示。为简化分析，仅以 $I_d=0$ 状态的永磁同步电动机来进行分析，此时的相量图如图 5.4-71 所示。

由于相电阻上的阻抗电压降很小，在忽略电压降后，有

$$\cos\varphi = \cos\left[\arctan\left(\frac{I_q X}{E_0}\right)\right] \tag{5.4-84}$$

在不计饱和时也可以表示为

$$\cos\varphi = \cos\left[\arctan\left(\frac{\Phi_1}{\Phi_m}\right)\right] \tag{5.4-85}$$

式中，Φ_1 为电枢电流单独作用产生的磁通；Φ_m 为永磁体单独作用产生的磁通。

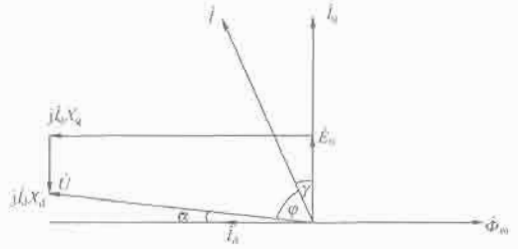


图 5.4-70　同步电动机相量图

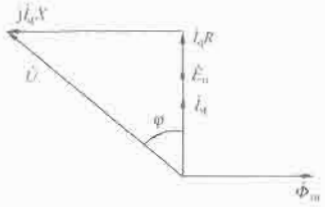


图 5.4-71　$I_d=0$ 时的相量图

式（5.4-84）和式（5.4-85）虽然忽略了电阻的电压降和饱和的影响，但可以描述影响功率因数的基本因素。要提高电动机的功率因数，提高 Φ_m，减小电动机的漏磁通是一个有效途径，因为它可以同时提高转矩密度。横向磁通电动机一般做成多极数，极间漏磁较大，因此它的功率因数与少极数电动机相比要低。如果减少横向磁通电动机中的极数，那么漏磁通减少，功率因数将提高。降低 Φ_1 虽可以提高功率因数，但同时会降低电动机的转矩密度。因此，要综合考虑各因素，达到最佳的平衡点。

10.5　工艺特点

横向磁通电动机定子的加工工艺复杂，并且铁损耗较大，影响电动机的性能，为了降低损耗，提高电动机性能，可采用硅钢板卷绕定子铁心结构，如图 5.4-72 所示。将带状硅钢板卷绕成环形，浸绝缘漆后形成一个整体铁心，将环状铁心切开制成电动机铁心。

卷绕结构降低了侧面产生涡流部分的厚度，减少了定子铁心侧面涡流损耗的影响，有利于提高电动机的效率和出力；加工不需要冲剪，定子铁心材料利用率接近 100%，工艺性提高，材料成本和加工成本都降低；电动机定子可以用机械化绕线，在铁心上机械绕线制成的磁极如图 5.4-73 所示。

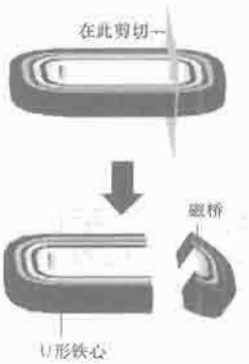


图 5.4-72　卷绕的定子铁心

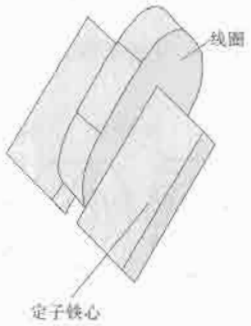


图 5.4-73　磁极示意图

11　爪极式永磁同步电动机

爪极式永磁同步电动机结构简单、运行可靠、转速低、转矩大、体积小，已广泛应用于家用电器中作定时器、程控器、时间继电器的驱动元件，用于转页式风扇、空调器导风装置、微波炉转盘机构等要求恒低速动力源的家用电器及类似用途机构上，在自动化仪器仪表中应用也很普遍。这种电机由于极数多，转子惯量小，具有自起动能力。根据起动时的不同特点，可分为自定向自起动式和不定向自起动式。前者的旋转方向是固定不变的，后者的转动方向是随机的或由外界控制的。

爪极式永磁同步电动机品种繁多，但归纳起来是由三种转子型式和三种定子型式组合配套而成。

11.1　转子结构型式

1）各向同性材料径向充磁式，如图 5.4-74 所示。它由各向同性的圆环形永磁体做成，并且用多极充磁头一次充磁形成多极永磁转子，成本很低，但磁场不很强。这种转子使用最多。

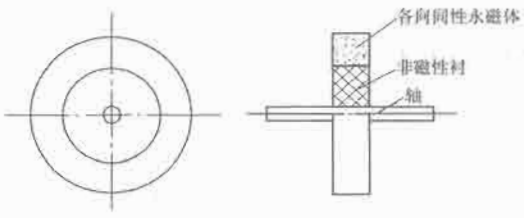


图 5.4-74　各向同性材料径向充磁式永磁转子

2）各向异性材料径向充磁式，如图 5.4-75 所示。转子材料在烧结之前用带状材料卷成环形，材料磁场取向与带面垂直，卷成环形并烧结后，成为径向取向的各向异性材料转子，经多极充磁后，可获得磁场强度比各向同性高约 1/3 的永磁转子，但成本高。

3）轴向充磁爪极式，如图 5.4-76 所示。这种方式用轴向取向各向异性永磁材料充磁，充磁方向取轴向，形成两极圆磁片，两端包含两组极性相反、爪极位置交错的铁磁爪极，这样也形成了与径向充磁式等效的多极转子，虽然它的作用与 1）、2）方式相同，但这种方式可以在直径很小（小

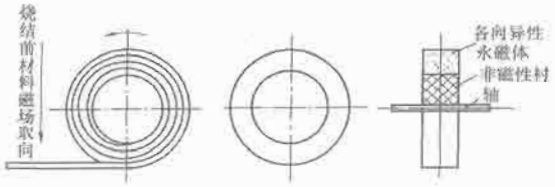


图 5.4-75 各向异性材料径向充磁式永磁转子

于 12mm）、又要求极数很多（超过 20 极）的情况下制成永磁转子。

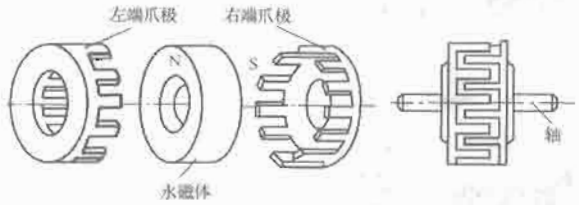


图 5.4-76 轴向充磁爪极式永磁转子

11.2 定子结构型式

1）对称爪极罩极式，如图 5.4-77 所示。这种型式用薄铁板冲压成两个端盖，爪极连在两端盖上，并在一个与外壳同心的内圆上均匀分布，左、右端爪极组极数相等，交替排列，但其中一端爪极组的每一个爪极形成两个分立子爪极，相同排列顺序的子爪极统一套上铜短路环形成罩极，起增大起动转矩的作用，铜短路环是一块铜片，在上述子爪极的分布位置打上孔，套在端盖内。

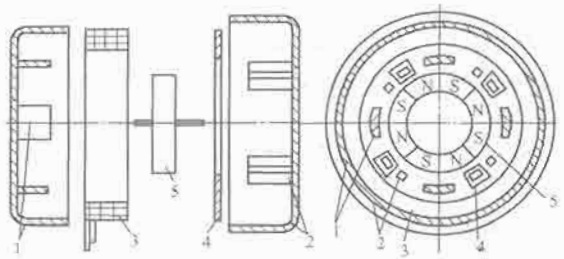


图 5.4-77 对称爪极罩极式永磁同步电动机分件图
1—带爪极左端盖；2—带爪极右端盖；3—定子绕组；4—短路铜环片；5—转子

2）不对称爪极式，如图 5.4-78 所示。这种型式与对称爪极罩极式结构类似，但爪极在端盖内圆的分布不均匀，极面大小也不统一，不分子爪极，可不用短路环，这种不对称分布使转子在定子绕组通电的最初一个周期内，受到切向电磁转矩的作用而牵入同步。某些需要定向起动又不采用定向装置的电动机，采用不对称爪极式时，不但爪极分布不均匀和大小不相等，而且左、右端爪极数不相等，某些极套以短路环适当配置后，可以使电动机在任何初始通电相位的情况下，第一个通电周期内，转子所受切向电磁转矩的方向是固定的，即自定向自起动式，它是不对称爪极式的特例。

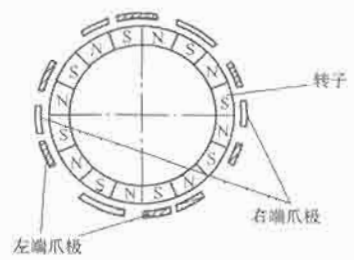


图 5.4-78 不对称爪极式永磁同步电动机定子爪极分布

3）[形磁路式，如图 5.4-79 所示。这种定子产生的小磁极不像爪极磁极那样 N、S 交替，而是上半部小磁极极性相同，下半部小磁极极性相反，定子小磁极极距是转子极距的两倍。这种定子虽然可以用 1）～3）各种永磁转子配套，但它的优点在于能做成极数很多的电动机，所以，常见这种定子与轴向充磁爪极式转子配套，制成低速同步电动机。当定子上半部小磁极与转子某一极性的一半磁极对齐时，定子下半部小磁极恰好与转子另一极性的一半磁极相对，转子上下总共一半磁极对着定子小磁极极槽，通电一个周期，转子转动一对极距角，如此同步运转下去。

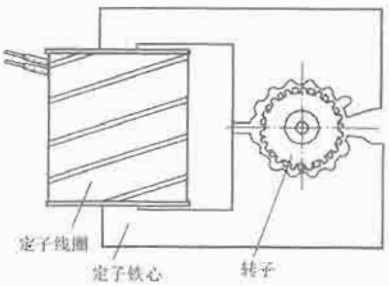


图 5.4-79 [形磁路式永磁同步电动机

上述三种转子和三种定子型式，包括不对称爪极式的不同特例，原理上可任意由某种定子和转子组成电动机。爪极式永磁同步电动机的附加部件除了定向装置、短路环、多级齿轮减速器外，还有允摆片，它可以用于 1）～3）各种转子型式中，目的是进一步提高电动机的起动能力，它要求在转子支架上铣一条直槽，允摆片置于槽内，允摆片与转轴固定，转轴相对于转子环可在一个不大的角度范围内摆动，如图 5.4-80 所示。这种结构使转子起动瞬间与负载阻力矩脱离，带动负载时已经达到一定转速，相当于增大了电动机的起动转矩。



图 5.4-80 带允摆片永磁转子

由于定、转子可以组合，以及极数设计、附加部件选择等的灵活性，使爪极式永磁同步电动机品种规格很多，且制造成本低。它既可用于恒速驱动装置，也常用于各种无恒速要求的驱动场合。

11.3 定向装置

爪极式永磁同步电动机除了用爪极的极形及分布产生定向起动转矩使转子定向旋转外，还可以使用机械定向装置使转子定向旋转。用于自起动爪极式永磁同步电动机的定向装置的结构多种多样，有单棘轮式、弹簧式、滚柱式、普通棘轮式和特种棘轮式等。

1）单棘轮式定向装置。这是比较简单的一种定向装置，仅由棘轮和撑杆组成，如图 5.4-81 所示。当棘轮顺时针方向旋转时，被撑杆阻挡，棘轮只能逆时针方向旋转。缺点是在转动时棘轮和撑杆间存在摩擦和敲击声。

2）弹簧式定向装置。如图 5.4-82 所示，弹簧套在电动机的转轴上，它的一端则固定在电动机的静止部位上。当面

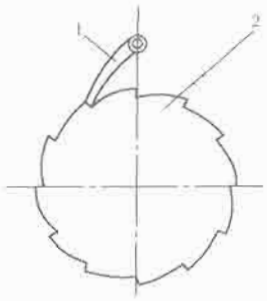


图 5.4-81　单棘轮式定向装置
1—撑杆；2—棘轮

向轴伸端看，轴可以逆时针方向旋转，此时弹簧是放松的。如果轴顺时针方向旋转，弹簧被扭紧，此时因轴与弹簧间的摩擦力迅速加大而使转轴停转。这种装置对弹簧的弹性及内孔尺寸要求较高，既不能过大地增加电动机的摩擦阻力，又要保证逆转时装置能起作用。

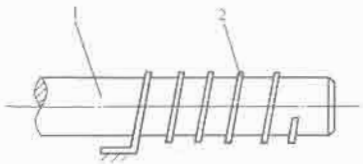


图 5.4-82　弹簧式定向装置
1—转轴；2—弹簧

3）滚柱式定向装置。滚柱式定向装置如图 5.4-83 所示，装置由一个与轴连在一起的铜质外圈，一个固定在定子上的铜质内盘及两片弹簧和两只钢质滚柱组成。当转轴顺时针方面转动，钢质滚柱被外圈推向大间隙，允许正常运转。但当轴逆时针转动，弹簧片把滚柱推向小间隙而产生制动力矩。这种定向装置的优点是反转角小，制动迅速；但制造稍困难，且铜质外圈易磨损，定向也可能失灵。

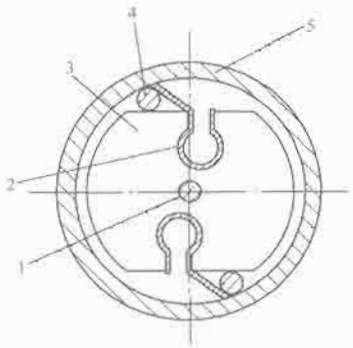


图 5.4-83　滚柱式定向装置
1—转轴；2—弹簧片；3—内盘；4—滚柱；5—外圈

4）普通棘轮定向装置。普通棘轮定向装置如图 5.4-84 所示，主棘轮和从棘轮的啮合面为渐开线；在主棘轮的每个齿上单面铣缺口，从棘轮却单面为凹面。当主棘轮逆时针方向转动时，啮合面为渐开线，轴能正常运转。若主棘轮顺时针方向转动时，从棘轮的齿顶顶入主棘轮的缺口内，主棘轮即被制动。如果要改变电动机的转向时，需要将主、从轮同时翻转一个方向才可。

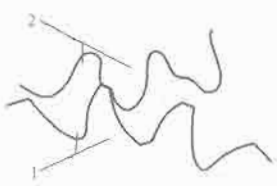


图 5.4-84　普通棘轮定向装置
1—从棘轮；2—主棘轮

5）特种棘轮定向装置。特种棘轮定向装置如图 5.4-85 所示，主、从棘轮的啮合面也是渐开线，但从棘轮的每个齿被铣去一半。当主棘轮顺时针方向旋转，因啮合面是渐开线故能正常运转。但若主棘轮逆时针方向旋转，从棘轮的齿顶就会顶在主棘轮的齿面上，主棘轮被制动。这种装置的优点是改变电动机转向较方便，只要将从棘轮翻转一个方向即可。

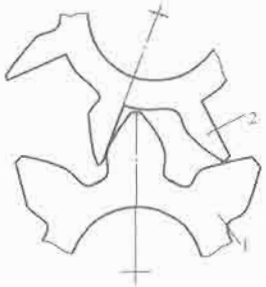


图 5.4-85　特种棘轮定向装置
1—主棘轮；2—从棘轮

11.4　爪极式永磁同步电动机的技术参数

爪极式永磁同步电动机品种繁多，JB/T 7805—1995《记录仪表用永磁同步电动机》规定了记录仪表用永磁同步电动机的基本参数，规定了电动机的额定电压等级（V）系列为 12、24、36、(100)、110、(200)、220（括弧内的数值不推荐使用），还规定了带减速器的电动机的转速（50Hz）应符合表 5.4-2 的规定。

表 5.4-2　记录仪表用永磁同步电动机的转速

单　位	转　　速
r/min	1　2　4　5　6　10　12　(15)　20　30　60
r/h	1　2　4　5　6　10　12　15　20　30　60
r/d	1　2　4　8　12

注　1. 括弧内的数值不推荐使用。
2. 60Hz 电机的转速＝50Hz 电机的转速×1.2。

家用电器用爪极式永磁同步电动机大多设计为带多级减速齿轮箱、偏心出轴的结构，因使用时通常对电动机的转向无特殊要求，因此多不带定向装置，电动机的额定频率 50Hz，额定电压 220V，经齿轮箱减速后，输出轴转速较低，通常不大于 33 r/min，JB/T 8311—1996《爪极式同步电动机技术条件》规定了电动机在电压和频率额定时的输入功率、牵入转矩和失步转矩大于表 5.4-3 的规定值。

表 5.4-3　爪极式同步电动机的技术参数

电动机输出轴转速（r/min）	2.5	3	5	30	33
输入功率（W）	4				
牵入转矩（mN·m）	700	650	400	78	70
失步转矩（mN·m）	700	650	400	78	70

12　典型产品数据

12.1　纺织化纤永磁电动机

永磁同步电动机在纺织化纤领域应用广泛，如纺丝计量泵电动机、油剂泵电动机、导丝（热）辊、导丝盘电动机、罗拉电动机、卷绕头电动机、高速弹力丝机、加弹机、倍捻机、经编机、精梳机、并卷机、织机等。其中高整步高效钕铁硼永磁同步电动机（以下简称高整步电动机），主要应用在具有高转动惯量负载的情况，例如在化纤行业用于合成纤维长、短丝纺丝机等要求转速恒定机器的传动。表 5.4-4 为 FYXZ 系列高整步电动机的性能指标，表 5.4-5 为 FTY2 系列化纤纺织用高整步电动机技术数据。表 5.4-6～表 5.4-10 为 FTBZ 系列纺织化纤电动机的主要技术参数。

表 5.4-4 TYXZ 系列高整步电动机主要技术指标

电动机型号	额定参数		满载时			堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	失步转矩/额定转矩	整步性能		使用频率范围
	功率	电压	电流	效率	功率因数				整步转矩/额定转矩	飞轮力矩	
	W	V	A	%	cosφ	倍	倍	倍	倍	kg·m²	Hz
TYXZ-150-2	150	125	1.05	79.8	0.83	8	2.5	1.8	1.2	0.015	50～150
TYXZ-180-2	180	220	0.75	80.2	0.80	8	2.5	1.7	1.2	0.015	20～80
TYXZ-250-2	250	170	1.30	81.5	0.81	8	2.5	1.7	1.2	0.015	50～120
TYXZ-370-2	370	237.5	1.40	82.0	0.78	8	2.5	1.6	1.2	0.015	30～80
TYXZ-750-2	750	225	2.70	83.8	0.87	8	2.5	1.6	1.0	0.025	20～85
TYXZ-2200-2	2200	250	6.70	88.5	0.87	8	2.5	1.6	1.2	0.35	10～80
TYXZ-90-4	90	220	0.40	72.5	0.84	10	2.5	1.6	1.2	0.015	20～70
TYXZ-120-4	120	200	0.60	76.5	0.85	7	2.5	1.6	1.2	0.015	20～55
TYXZ-180-4	180	200	0.80	78.0	0.87	8	2.5	1.6	1.2	0.015	20～55
TYXZ-250-4	250	115	2.20	75.0	0.76	7	2.0	1.6	1.1	0.10	40～110
TYXZ-370-4	370	110	3.10	80.2	0.80	7	2.5	1.5	1.2	0.05	40～110
TYXZ-550-4	550	173	2.50	82.5	0.88	9	2.0	1.5	1.0	0.350	40～110
TYXZ-750-4	750	110	5.50	83.5	0.86	8	2.5	1.5	1.2	0.13	40～110
TYXZ-1100-4	1100	100	9.20	83.8	0.82	6	2.2	1.5	1.1	0.35	29～185
TYXZ-1500-4	1500	110	11.80	84.0	0.79	6	1.5	1.8	0.9	0.50	40～110
TYXZ-2200-4	2200	283	6.20	86.8	0.84	8	2.5	1.8	1.2	1.50	15～60
TYXZ-2500-4	2500	284	6.60	87.0	0.86	9	2.5	1.8	1.3	0.35	20～60
TYXZ-5500-4	5500	380	10.20	89.5	0.91	7	2.2	1.8	1.0	0.35	20～60
TYXZ-60-6	60	220	0.31	72.2	0.73	9	2.5	1.6	1.2	0.015	25～80
TYXZ-90-6	90	220	0.44	75.2	0.72	7	2.5	1.6	1.4	0.015	25～80

表 5.4-5 FTY2 系列高整步电动机技术数据

电动机型号	额定参数				满载时			堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	牵入性能		使用频率范围(Hz)	重量(kg)
	功率(kW)	电压(V)	频率(Hz)	同步转速(r/min)	电流(A)	效率(%)	功率因数				牵入转矩/额定转矩	飞轮惯量(负荷)		
FTY2-150-2	0.15	125	50	3000	1.41	70	0.78	8	2	1.2	0.8	0.025	50～150	14
FTY2-250-2	0.25	170	50	3000	1.53	71	0.78	8	2	1.2	0.8	0.025	50～120	14
FTY2-600-2	0.6	100	50	3000	5.6	78	0.79	8	2	1.2	0.8	0.025	20～142	30
FTY2-1900-2	1.9	125	50	3000	12.3	85	0.84	7	2	1.2	0.8	0.35	9～180	40
FTY2-2200-2	2.2	250	50	3000	6.7	89	0.85	10	2	1.6	1.4	0.35	10～80	45
FTY2-4000-2	4	325	50	3000	9.6	90	0.82	8	3	1.1	0.8	0.35	20～60	82
FTY2-5500-2	5.5	325	50	3000	13.2	90	0.82	8	3	1.1	0.8	0.35	20～60	82
FTY2-2500-4	2.5	283.5	50	1500	7.6	83	0.81	10	1.8	1.1	1.4	0.35	20～60	80
FTY2-3000-4	3	317	50	1500	7.4	83	0.90	17	1.8	1.4	1.0	0.35	15～70	80
FTY2-4000-4	4	317	50	1500	9.64	84	0.90	10	1.8	1.4	1.0	0.35	15～70	86
FTY2-5000-4	5	317	50	1500	11.8	86	0.90	10	1.8	1.4	1.0	0.35	20～80	86
FTY2-11000-4	11	380	50	1500	19.5	93	0.91	10	1.8	1.4	1.0	0.35	25～100	180
FTY2-13000-4	13	380	50	1500	23.1	94	0.91	10	1.8	1.4	1.0	1.5	25～100	180
FTY2-15000-4	15	380	50	1500	16.3	94	0.92	10	1.8	1.4	1.0	1.4	25～100	200
FTY2-17000-4	17.0	380	50	1500	29.9	94	0.92	10	1.8	1.4	1.0	1.4	25～100	220
FTY2-18500-4	18.5	380	50	1500	32.5	94	0.92	10	1.8	1.2	1.2	1.4	25～100	220
FTY2-550-6	0.55	152	50	1000	3.27	82	0.78	10	2	2.2	1.2	0.025	25～70	38
FTY2-1500-6	1.50	380	50	1000	3.43	85	0.78	10	2	2.2	1.4	0.35	25～70	47
FTY2-10000-6	10.0	380	50	1000	18.2	91	0.92	10	1.8	1.7	1.1	1.5	25～70	170
FTY2-120-6	0.12	220	50	1000	0.45	78	0.92	10	1.8	1.0	0.5	0.04	15～120	
FTY2-250-6	0.25	220	50	1000	0.91	80	0.92	10	1.8	1.0	0.5	0.04	15～120	
FTY2-5500-6	5.5	380	50	1000	10.9	90	0.92	10	1.8	1.0	1.0	0.35	15～120	

表 5.4-6　　FTBZ 系列 45～80 机座号电气参数

序　号	型　　号	功率(kW)	电压(V)	频率(Hz)	转速(r/min)	电流(A)	转矩(N·m)	重量(kg)
45-1	TYBZ-06-45-4	0.008～0.06	30～220	8～60	240～1800	0.3	0.32	2.5
45-2	TYBZ-06-45-4	0.008～0.06	51～380	8～60	240～1800	0.16	0.32	2.5
45-3	TYBZ-12-45-4	0.016～0.12	51～380	8～60	240～1800	0.3	0.64	2.5
45-4	TYBZ-12-45-4	0.013～0.12	42～380	10～90	300～2700	0.25	0.43	2.5
45-5	TYBZ-12-45-4	0.02～0.12	33.3～200	10～60	300～1800	0.4	0.64	2.5
56-1	TYBZ-18-56-2	0.053～0.18	112～380	0～170	3000～10200	0.5	0.17	5
56-2	TYBZ-20-56-2	0.006～0.2	12～380	10～330	600～19800	0.5	0.1	5
63-1	TYBZ-18-63M-4	0.036～0.18	76～380	10～50	300～1500	0.45	1.15	5
71-1	TYBZ-50-71M-4	0.074～0.37	76～380	15～75	450～2250	1.18	1.57	6
71-2	TYBZ-50-71M-4	0.083～0.5	63～380	10～60	300～1800	1.1	2.65	6
71-3	TYBZ-50-71M-4	0.083～0.5	37～220	10～60	300～1800	1.8	2.65	6
80-1	TYBZ-80-80M-2	0.37～0.8	173～380	50～110	3000～6600	1.38	1.16	20
80-2	TYBZ-29-80M-2	0.38～0.74	195～399	65～133	3900～7980	1.21	0.88	20
80-3	TYBZ-39-80M-2	0.39～0.8	185～375	66～134	3960～8040	1.8	0.95	20
80-4	TYBZ-81-80M-2	0.25～0.8	119～380	50～160	3000～9600	1.38	0.8	20
80-5	TYBZ-26-80M-4	0.04～0.26	52～380	15～110	450～3300	0.44	0.76	20
80-6	TYBZ-50-80M-4	0.133～0.5	62～230	72～270	2160～8100	2.1	0.6	20
80-7	TYBZ-75-71M-4	0.12～0.75	61～380	64～400	1920～12000	2	0.6	20
80-8	TYBZ-50-80M-4	0.25～0.5	127～380	20～60	600～1800	0.9	2.65	20
80-9	TYBZ-75-80M-4	0.25～0.75	127～380	20～60	600～1800	1.4	4	20
80-10	TYBZ-50-80M-4	0.03～0.5	23～380	5～82	150～2460	1.14	1.94	20
80-11	TYBZ-75-80M-4	0.15～0.75	76～380	10～50	300～1500	1.9	4.78	20
80-12	TYBZ-75-80M-4	0.225～0.75	60～200	15～50	450～1500	3.2	4.78	20
80-13	TYBZ-75-80M-4	0.112～0.75	57～380	15～100	450～3000	1.43	2.39	20
80-14	TYBZ-110-80M-4	0.22～1.1	76～380	20～100	600～3000	2.3	3.5	20
80-15	TYBZ-120-80M-4	0.22～1.2	34.5～380	10～110	600～3300	2.5	3.47	20
80-16	TYBZ-120-80M-4	0.225～1.2	37.5～200	15～80	450～2400	5	4.8	20
80-17	TYBZ-46-80M-6	0.05～0.46	37.5～330	25～220	500～4400	1	1	20
80-18	TYBZ-55-80M-6	0.055～0.55	38～380	15～150	300～3000	1	1.75	20
80-19	TYBZ-75-80M-6	0.075～0.75	38～380	15～150	300～3000	1.5	2.39	20
80-20	TYBZ-110-80M-6	0.058～1.1	20～380	4～75	80～1500	2.8	7	20
80-21	TYBZ-120-80M-6	0.06～1.2	19～380	5～100	100～2000	3	5.73	20
80-22	TYBZ-153-80M-8	0.048～0.15	112～380	16～50	240～750	0.4	1.91	20
80-23	TYBZ-63-80M-100	0.063	380	50	60	0.7	10	20

表 5.4-7　　FTBZ 系列 90 机座号电气参数

序　号	型　　号	功率(kW)	电压(V)	频率(Hz)	转速(r/min)	电流(A)	转矩(N·m)	重量(kg)
90-1	TYBZ-100-90L-2	0.1～1	38～380	30～300	1800～18000	2.5	0.53	28
90-2	TYBZ-27-90L-4	0.12～0.27	166.7～380	25～57	750～17100	0.7	1.51	28
90-3	TYBZ-27-90L-4	0.16～0.56	109～380	20～70	600～2100	2.6	2.55	28
90-4	TYBZ-100-90L-4	0.25～1.0	95～380	15～60	450～1800	2.4	5.3	28
90-5	TYBZ-110-90L-4	0.11～1.1	38～380	10～100	300～3000	2.3	3.5	28
90-6	TYBZ-110-90L-4	0.22～1.1	76～380	10～50	300～1500	3	7	28
90-7	TYBZ-110-90L-4	0.37～1.1	127～380	20～60	600～1800	2	5.84	28
90-8	TYBZ-120-90L-4	0.3～1.2	50～200	15～60	450～1800	4.3	6.37	28
90-9	TYBZ-160-90L-4	0.2～1.6	25～200	10～80	300～2400	5.5	6.37	28
90-10	TYBZ-110-90L-4	0.055～1.1	19～380	5～100	150～3000	2.32	3.5	28
90-11	TYBZ-150-90L-4	0.15～1.5	38～380	10～100	300～3000	2.8	4.78	28
90-12	TYBZ-150-90L-4	0.188～1.5	48～380	10～80	300～2400	3.2	5.97	28
90-13	TYBZ-160-90L-4	0.188～1.6	48～380	10～80	300～2400	3.4	6.37	28
90-14	TYBZ-150-90L-4	0.21～1.5	54～380	20～140	600～4200	2.7	3.41	28
90-15	TYBZ-150-90L-4	0.3～1.5	76～380	10～50	300～1500	3.8	9.55	28
90-16	TYBZ-200-90L-4	0.67～2	127～380	20～60	600～1800	4.5	10.61	28
90-17	TYBZ-300-90L-4	0.3～3	38～380	40～400	1200～12000	8.5	2.39	28
90-18	TYBZ-150-90L-6	0.075～1.5	19～380	5～100	100～2000	3.2	7.2	28
90-19	TYBZ-150-90L-6	0.43～1.5	54～188	22～75	430～1500	5.8	9.55	28
90-20	TYBZ-150-90L-6	0.43～1.5	63～220	22～75	430～1500	9.7	9.55	28
90-21	TYBZ-180-90L-6	0.18～1.8	38～380	15～150	300～3000	3.5	5.7	28

表 5.4-8 FTBZ 系列 100 机座号电气参数

序号	型号	功率(kW)	电压(V)	频率(Hz)	转速(r/min)	电流(A)	转矩(N·m)	重量(kg)
100-1	TYBZ-160-100L-2	0.4～1.6	50～200	15～60	450～1800	5.2	8.5	40
100-2	TYBZ-220-100L-4	0.22～2.2	38～380	10～100	30～3000	4.2	6.97	40
100-3	TYBZ-220-100L-4	0.28～2.2	48～380	10～80	300～2400	4.4	8.7	40
100-4	TYBZ-295-100L-4	0.66～2.95	84.9～380	15～67	450～2010	6.2	14	40
100-5	TYBZ-180-100L-4	0.6～1.8	127～380	20～60	600～1800	3.8	9.5	40
100-6	TYBZ-264-100L-4	0.88～2.64	127～380	20～60	600～1800	5.5	14	40
100-7	TYBZ-264-100L-4	0.88～2.64	166～498	20～60	600～1800	3.8	14	40
100-8	TYBZ-240-100L-4	0.45～2.4	38～200	15～80	450～2400	8.5	9.55	40
100-9	TYBZ-300-100L-4	0.23～3	29～380	10～130	300～3900	6.2	7.35	40
100-10	TYBZ-240-100L-4	0.3～2.4	48～380	10～80	300～2400	5	9.5	40
100-11	TYBZ-300-100L-4	0.375～3	48～380	10～80	300～2400	6.2	11.94	40
100-12	TYBZ-240-100L-4	0.74～2.4	112～360	22～71	660～2130	4.9	10.76	40
100-13	TYBZ-300-100L-4	0.85～3	107～380	20～71	600～2130	6	13.45	40
100-14	TYBZ-360-100L-4	0.3～3.6	32～380	5～60	150～1800	7.5	19.1	40
100-15	TYBZ-400-100L-4	0.8～4	76～380	10～50	300～1500	8.5	25.47	50
100-16	TYBZ-480-100L-4	1.6～4.8	127～380	20～60	600～1800	10	25.47	50
100-17	TYBZ-300-100L-4	0.3～3	38～380	10～100	300～3000	5.8	9.55	40
100-18	TYBZ-370-100L-4	0.37～3.7	38～380	10～100	300～3000	7.3	11.78	40
100-19	TYBZ-200-100L-4	0.235～2	45～380	20～170	600～5100	3.2	3.75	40
100-20	TYBZ-265-100L-4	0.432～2.65	62～380	29～177	870～5310	6	4.78	40
100-21	TYBZ-285-100L-4	0.75～3.1	92～380	50～206	1500～6180	6.3	4.8	40
100-22	TYBZ-300-100L-4	0.3～3	38～380	30～300	900～9000	6.4	3.18	40
100-23	TYBZ-388-100L-4	0.635～3.89	62～380	29～177	870～5310	8	7	40
100-24	TYBZ-120-100L-6	0.3～1.2	88～352	20～80	400～1600	2.5	7.16	40
100-25	TYBZ-150-100L-6	0.436～1.5	54～188	22～75	430～1500	5.7	9.55	40
100-26	TYBZ-200-100L-6	0.35～2	67～380	17～97	340～1940	3.8	9.8	40
100-27	TYBZ-200-100L-6	0.8～2	152～380	20～50	400～1000	4.5	19.1	40
100-28	TYBZ-225-100L-6	0.375～2.25	63～375	25～150	500～3000	4.8	7.16	40
100-29	TYBZ-243-100L-6	0.552～2.43	46～204	20～88	600～2640	9	8.8	40

表 5.4-9 FTBZ 系列 112 机座号电气参数

序号	型号	功率(kW)	电压(V)	频率(Hz)	转速(r/min)	电流(A)	转矩(N·m)	重量(kg)
112-1	TYBZ-300-112L-4	0.85～3	107～380	20～71	600～2130	5.5	13.45	50
112-2	TYBZ-355-112L-4	1.1～3.55	112～360	22～71	660～2130	7	15.92	55
112-3	TYBZ-369-112L-4	1.1～3.69	112～360	22～71	660～2130	7.2	16.55	50
112-4	TYBZ-400-112L-4	0.5～4	48～380	10～80	300～2400	8.4	15.92	50
112-5	TYBZ-520-112L-4	0.39～5.2	29～380	6～80	180～2400	9.5	20.7	55
112-6	TYBZ-400-112L-4	0.67～4	63～380	10～60	300～1800	8.4	21.22	50
112-7	TYBZ-400-112L-4	0.8～4	76～380	10～50	300～1500	9.2	25.5	50
112-8	TYBZ-450-112L-4	1.27～4.5	107～380	20～71	600～2130	8.8	20.18	50
112-9	TYBZ-550-112L-4	0.275～5.5	19～380	5～100	150～3000	11.4	17.51	55
112-10	TYBZ-550-112L-4	1.1～5.5	76～380	10～50	300～1500	12.8	35	50
112-11	TYBZ-200-112L-4	0.294～2	56～380	25～170	750～5100	4.2	3.7	50
112-12	TYBZ-280-112L-4	0.41～2.8	56～380	25～170	750～5100	6	5.2	50

续表

序　号	型　　号	功率(kW)	电压(V)	频率(Hz)	转速(r/min)	电流(A)	转矩(N·m)	重量(kg)
112-13	TYBZ-400-112L-4	0.88～4	90～380	40～200	1200～6000	7	6.4	50
112-14	TYBZ-200-112L-6	0.8～2	152～380	20～50	400～1000	4	19.1	50
112-15	TYBZ-280-112L-6	1.0～2.8	136～380	25～70	500～1400	5	19.1	50
112-16	TYBZ-264-112L-6	0.22～2.64	32～380	5～60	100～1200	6	21.01	50
112-17	TYBZ-300-112L-6	0.6～3	76～380	10～50	200～1000	8.5	28.64	50
112-18	TYBZ-324-112L-6	0.57～3.24	67～380	17～97	340～1940	6	15.59	50
112-19	TYBZ-340-112L-6	0.439～2.8	50～380	20～155	400～3100	7.2	10.5	50
112-20	TYBZ-360-112L-6	0.36～3.6	38～380	6～60	120～1200	7.8	28.5	50
112-21	TYBZ-368-112L-6	0.63～3.68	67～400	17～102	340～2040	6.8	17.24	50
112-22	TYBZ-400-112L-6	0.67～4	63～380	10～60	200～1200	9.5	31.8	50
112-23	TYBZ-420-112L-6	0.73～4.2	67～380	17～97	340～1940	7.8	20.7	50
112-24	TYBZ-150-112L-8	0.12～1.5	30～380	8～100	120～1500	3	9.55	50
112-25	TYBZ-150-112L-8	0.15～1.5	38～380	20～200	300～3000	2.8	4.78	50
112-26	TYBZ-200-112L-8	0.667～2	127～380	20～60	300～900	3.8	21.2	50
112-27	TYBZ-220-112L-8	0.176～2.2	30～380	8～100	120～1500	4.8	14	50
112-28	TYBZ-300-112L-8	0.24～3	30～380	8～100	120～1500	6.4	19.1	50
112-29	TYBZ-300-112L-8	0.36～3	46～380	6～50	90～750	6.3	38	50
112-30	TYBZ-400-112L-8	0.4～4	38～380	10～100	50～1500	7.9	25.5	50

表 5.4-10　　FTBZ 系列 132～280 机座号电气参数

序　号	型　　号	功率(kW)	电压(V)	频率(Hz)	转速(r/min)	电流(A)	转矩(N·m)	重量(kg)
132-1	TYBZ-300-132S-4	1.54～4.79	112～360	22～71	660～2130	9.1	22.28	68
132-2	TYBZ-355-132S-4	0.55～5.5	38～380	5～50	150～1500	11	35	65
132-3	TYBZ-369-132S-4	0.55～5.5	38～380	6～60	180～1800	9.5	29.18	65
132-4	TYBZ-400-132S-4	0.55～5.5	38～380	10～100	300～3000	9.8	17.5	65
132-5	TYBZ-520-132S-4	0.69～5.5	48～380	10～80	300～2400	10	21.9	65
132-6	TYBZ-400-132S-4	0.42～5.5	29～380	10～130	300～3900	9	13.5	65
132-7	TYBZ-400-132S-4	0.85～5.5	46～299	20～130	600～3900	12	13.5	65
132-8	TYBZ-450-132S-4	1.94～6.25	112～360	22～71	660～2130	12.3	28	70
132-9	TYBZ-550-132M-4	1.04～3.4	110～360	26～85	780～2550	6.4	12.73	65
132-10	TYBZ-550-132M-4	0.94～7.5	48～380	10～80	300～2400	14.8	29.84	65
132-11	TYBZ-200-132M-4	1.5～7.5	76～380	10～50	300～1500	16.2	48	75
132-12	TYBZ-280-132M-4	2.5～7.5	127～380	20～60	600～1800	14.9	39.79	75
132-13	TYBZ-400-132M-4	2.64～8.52	112～360	22～71	660～2130	16.8	38.2	75
132-14	TYBZ-200-132S-6	0.6～3	76～380	10～50	200～1000	6	28.65	65
132-15	TYBZ-280-132S-6	0.48～4.8	38～380	6～60	120～1200	10	38	65
132-16	TYBZ-264-132M-6	0.3～3	38～380	5～50	100～1000	9	28.65	65
132-17	TYBZ-300-132S-6	0.66～6.6	38～380	6～60	120～1200	13	52	65
132-18	TYBZ-324-132S-6	2.4～7.2	127～380	50～150	1000～3000	13	23	65
132-19	TYBZ-340-132M-6	0.75～7.5	38～380	6～60	120～1200	15	59.7	65
132-20	TYBZ-360-132M-6	1.1～11	38～380	10～100	300～3000	19.6	35.02	70
160-1	TYBZ-1100-160L-4	2.2～11	76～380	10～50	300～1500	20.4	70	140
160-2	TYBZ-1100-160L-4	1.1～11	38～380	10～100	300～3000	17.6	35.02	140
160-3	TYBZ-1500-160L-4	3.0～15	76～380	10～50	300～1500	31	95.5	140
160-4	TYBZ-1800-160L-4	1.8～18	38～380	5～50	150～1500	38	114.6	140

续表

序 号	型 号	功率(kW)	电压(V)	频率(Hz)	转速(r/min)	电流(A)	转矩(N·m)	重量(kg)
160-5	TYBZ-2200-160L-4	2.2～22	38～380	5～50	150～1500	46	140	140
160-6	TYBZ-2200-160L-4	2.2～22	38～380	10～100	300～3000	48	70	140
180-1	TYBZ-180-180M-8	0.48～4.8	38～380	6～60	90～900	10	51	180
180-2	TYBZ-550-180M-8	0.48～4.8	38～380	5～50	90～750	10	61	180
180-3	TYBZ-1500-180M-8	1.2～15	30～380	8～100	120～1500	31.6	96	180
180-4	TYBZ-1800-180M-8	1.125～18	24～380	6.25～100	94～1500	38	115	180
180-5	TYBZ-1080-180M-8	2.7～10.8	57～228	7.5～30	75～300	40	342	180
200-10	TYBZ-3000-200L-4	6.0～30	76～380	10～50	300～1500	53	191	200
225-1	TYBZ-2200-225S-8	1.37～22	24～380	6.25～100	94～1500	47	140	282
225-2	TYBZ-3000-225S-8	1.87～30	24～380	6.25～100	94～1500	63.3	191	295
225-3	TYBZ-3700-225S-8	2.3～37	24～380	6.25～100	94～1500	80	236	300
280-1	TYBZ-7500-280S-4	15～75	76～380	10～505	300～1500	158	477.5	510

12.2 风机泵类用中型变频调速电动机

目前厂矿企业大部分风机、水泵类设备仍存在效率低、能耗高的情况，沈阳工业大学研制的 TYVF 系列的变频调速永磁电动机正是为了解决以上问题而研制的，该系列电动机与感应电动机变频系统相比具有高效节能、功率因数高、转速控制精度高、输出特性好、过载能力大等显著优点。表 5.4-11列出了 TYVF 系列电动机的部分技术参数。

表 5.4-11 TYVF 系列电动机的部分技术参数

型 号	功率(kW)	效率 η(%)	功率因数
TYVF 115-4	115	93.8	0.95
TYVF 135-4	135	94.3	0.95
TYVF 155-4	155	94.3	0.95
TYVF 180-4	180	94.5	0.95
TYVF 200-4	200	94.5	0.95
TYVF 225-4	225	94.5	0.95
TYVF 260-4	260	94.7	0.96
TYVF 300-4	300	94.9	0.95

12.3 抽油机用高效高起动转矩永磁同步电动机

表 5.4-12 列出了抽油机用 TYQ 系列高效高起动转矩永磁同步电动机的技术参数。

12.4 无齿轮曳引机用永磁伺服电动机

低速大转矩的永磁伺服电动机可实现电梯的无机房化，并能省去减速箱，实现无齿轮直接驱动，效率高，功率因数高，运行可靠，已在电梯上得到了广泛的应用，表 5.4-13 列出了 250 型交流永磁同步无齿轮曳引机的基本参数。表 5.4-14 列出了 WYT-S 系列曳引机的技术数据。

12.5 ST-M 系列永磁交流伺服电动机

表 5.4-15～表 5.4-18 为 ST-M 系列永磁交流伺服电动机的技术参数。

表 5.4-12 抽油机用 TYQ 系列高效高起动转矩永磁同步电动机的技术参数

型 号	功率(kW)	效率 η(%)	功率因数	堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	失步转矩/额定转矩	最小转矩/额定转矩
TYQ 132S-4	5.5	91.5	0.93	10.5	3.2	2.5	1.3
TYQ 132M-4	7.5	92.2	0.93	10.5	3.2	2.5	1.3
TYQ 132M2-6	5.5	92.0	0.93	10.0	3.2	2.4	1.3
TYQ 160M-4	11.0	93.5	0.93	10.5	3.2	2.5	1.5
TYQ 160M-6	7.5	92.2	0.93	10.0	3.2	2.4	1.3
TYQ 160M2-8	5.5	92.5	0.93	10.0	3.2	2.4	1.3
TYQ 160L-4	15.0	93.5	0.93	10.5	3.2	2.5	1.5
TYQ 160L-6	11.0	92.5	0.93	10.0	3.2	2.4	1.5
TYQ 160L-8	7.5	93.0	0.93	9.0	3.2	2.4	1.3
TYQ 180M-4	18.5	93.5	0.93	12.0	3.2	2.5	1.5
TYQ 180L-4	22.0	93.8	0.93	12.0	3.0	2.5	1.5
TYQ 180L-6	15.0	93.0	0.93	10.5	3.2	2.4	1.5
TYQ 180L-8	11.0	93.2	0.93	9.5	3.2	2.4	1.5
TYQ 200L1-6	18.5	93.2	0.93	10.5	3.2	2.4	1.5
TYQ 200L2-6	22.0	93.5	0.93	11.0	3.0	2.3	1.5
TYQ 160M2-8	15.0	93.5	0.93	9.5	3.2	2.4	1.5
TYQ 225S-8	18.5	94.0	0.93	10.0	3.2	2.4	1.5
TYQ 225M-6	30.0	93.8	0.93	11.0	3.0	2.3	1.5
TYQ 225M-8	22.0	94.0	0.93	10.0	3.0	2.3	1.5
TYQ 250M-6	37.0	93.8	0.93	11.0	3.0	2.2	1.7
TYQ 250M-8	30.0	94.2	0.93	10.0	3.0	2.3	1.5
TYQ 280S-6	45.0	94.0	0.93	11.0	3.0	2.2	1.7
TYQ 280S-8	37.0	94.2	0.93	10.5	3.0	2.2	1.7
TYQ 280M-8	45.0	94.5	0.93	10.5	3.0	2.2	1.7

表 5.4-13 250型交流永磁同步无齿轮曳引机的基本参数

型 号	速度 (m/s)	载重 (kg)	绕 比	曳引轮节径 (mm)	绳 槽 (mm)	电机转速 (r/min)	转 矩 (N·m)	电 压 (V)	电 流 (A)	功 率 (kW)
YWT250-630-1.0	1.0	630	2:1	φ410	φ10×4	93	442	300	11	4.3
YWT250-800-1.0		800					555		13	5.4
YWT250-1000-1.0		1000			φ10×5		698		16	6.8
YWT250-630-1.6	1.6	630				150	442		17	7.0
YWT250-800-1.6		800					555		19	8.7
YWT250-1000-1.6		1000			φ10×6		698		25	10.8
YWT250-630-2.0	2.0	630			φ10×5	186	442		21	8.5
YWT250-800-2.0		800			φ10×6		555		28	11.0
YWT250-1000-2.0		1000					698		29	13.5
YWT250-630-2.5	2.5	630				233	442		28	11.0
YWT250-800-2.5		800					555		33	13.5
YWT250-1000-2.5		1000					698		35	17.0
YWT250-1000-1.6	1.6	1000	1:1	φ180	φ12×6	64	1610	360	20	11.0
YWT250-1000-2.0	2.0	1000			φ12×7	80	1610		25	13.5
YWT250-1000-2.5	2.5	1000			φ12×8	99	1610		31	17.0

表 5.4-14 WYT-S系列曳引机的技术数据

型 号	载 重 (kg)	速 度 (m/s)	绳 轮 (mm)	绳 槽 (mm)	电 流 (A)	转 速 (r/min)	频 率 (Hz)	转 矩 (N·m)	功 率 (kW)	提升高度 (m)
WYT-S1.0A	450	1.0	400	4×10(Pitch16)	7.9	96	16.0	320	3.2	≤50~60
WYT-S1.6A	450	1.6	400	4×10(Pitch16)	12.8	153	25.5	320	5.1	≤50~60
WYT-S1.75A	450	1.75	400	4×10(Pitch16)	12.8	167	27.9	320	5.6	≤50~60
WYT-S1.0B	630	1.0	400	4×10(Pitch16)	10.8	96	16.0	460	4.6	≤50~60
WYT-S1.6B	630	1.6	400	4×10(Pitch16)	18.3	153	25.5	460	7.4	≤50~60
WYT-S1.75B	630	1.75	400	4×10(Pitch16)	18.3	167	27.9	460	8.0	≤50~60
WYT-S1.0C	800	1.0	400	5×10(Pitch16)	12.8	96	16.0	550	5.5	≤50~60
WYT-S1.6C	800	1.6	400	5×10(Pitch16)	21.7	153	25.5	550	8.8	≤50~60
WYT-S1.75C	800	1.75	400	5×10(Pitch16)	21.7	167	27.9	550	9.6	≤50~60
WYT-S1.0D	1000	1.0	400	5×10(Pitch16)	15.6	96	16.0	665	6.7	≤50~60
WYT-S1.6D	1000	1.6	400	5×10(Pitch16)	27.6	153	25.5	665	10.7	≤50~60
WYT-S1.75D	1000	1.75	400	5×10(Pitch16)	27.6	167	27.9	665	11.7	≤50~60
WYT-S1.0E	1200	1.0	340	8×8(Pitch16)	18.7	113	18.8	700	8.3	≤50~60
WYT-S1.6E	1200	1.6	340	5×10(Pitch16)	31.5	180	30.0	700	13.2	≤50~60
WYT-S1.75E	1200	1.75	340	8×8(Pitch16)	31.5	197	32.8	700	14.4	≤50~60

表 5.4-15 110系列永磁交流伺服电动机参数表

电机型号	110ST-M02030	110ST-M04030	110ST-M05030	110ST-M06020	110ST-M06030
功率(kW)	0.6	1.2	1.5	1.2	1.6
零速转矩(N·m)	2	4	5	6	6
额定转速(r/min)	3000	3000	3000	2000	3000
额定电流(A)	4.0	5.0	6.0	6.0	8.0
转子惯量($kg \cdot m^2$)	0.33×10^{-3}	0.65×10^{-3}	0.82×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
机械时间常数(ms)	3.64	2.32	2.03	1.82	1.82
编码器线数	2500				
电压绝缘等级	B				
使用环境	环境温度：0~55℃ 相对湿度：小于90%(无结露)				
防护等级	IP65				
电机重量(kg)	4.2	5.2	5.8	6.4	6.4

表 5.4-16 **130 系列永磁交流伺服电动机参数表**

电动机型号	130ST-M04025	130ST-M05025	130ST-M06025	130ST-M07720	130ST-M07730
功率(kW)	1.0	1.3	1.5	1.6	2.4
零速转矩(N·m)	4	5	6	7.7	7.7
额定转速(r/min)	2500	2500	2500	2000	3000
额定电流(A)	4.0	5.0	6.0	6.0	9.0
转子惯量(kg·m²)	0.85×10^{-3}	1.06×10^{-3}	10.26×10^{-3}	1.58×10^{-3}	1.58×10^{-3}
机械时间常数(ms)	3.75	3.07	2.83	2.44	2.44
编码器线数	2500				
电压绝缘等级	B				
使用环境	环境温度：0～55℃ 相对湿度：小于90%(无结露)				
防护等级	IP65				
电动机重量(kg)	7.4	7.9	8.6	9.5	9.5

表 5.4-17 **130 系列永磁交流伺服电动机参数表**

电动机型号	130ST-M10015	130ST-M10025	130ST-M15015	130ST-M15025
功率(kW)	1.5	2.6	2.3	3.9
零速转矩(N·m)	10	10	15	15
额定转速(r/min)	1500	2500	1500	2500
额定电流(A)	6.0	10.0	9.5	17.0
转子惯量(kg·m²)	2.14×10^{-3}	2.14×10^{-3}	3.24×10^{-3}	3.27×10^{-3}
机械时间常数(ms)	2.11	2.11	3.24	3.24
编码器线数	2500			
电压绝缘等级	B			
使用环境	环境温度：0～55℃ 相对湿度：小于90%(无结露)			
防护等级	IP65			
电动机重量(kg)	11.1	11.1	14.3	14.3

表 5.4-18 **150 系列永磁交流伺服电动机参数表**

电动机型号	150ST-M04025	150ST-M05025	150ST-M06025	150ST-M07720	150ST-M07730
功率(kW)	3.6	3.8	3.6	4.7	5.5
零速转矩(N·m)	12	15	18	23	27
额定转速(r/min)	3000	2500	2000	2000	2000
额定电流(A)	16.5	16.5	16.5	20.5	20.5
转子惯量(kg·m²)	4.2×10^{-3}	5.2×10^{-3}	6.3×10^{-3}	8.0×10^{-3}	9.4×10^{-3}
机械时间常数(ms)	3.75	3.07	2.83	2.44	2.44
编码器线数	2500				
电压绝缘等级	B				
使用环境	环境温度：0～55℃ 相对湿度：小于90%(无结露)				
防护等级	IP65				
电动机重量(kg)	7.4	7.9	8.6	9.5	9.5

第5章　永磁同步发电机

1　特点和分类

永磁同步发电机具有许多优点：省去了励磁绕组和容易出问题的集电环和电刷，结构较为简单，加工和装配费用减少，运行更为可靠。采用稀土永磁后可以增大气隙磁通密度，并可把发电机转速提高到最佳值，从而显著缩小发电机体积，提高功率密度；也可制成多极低速发电机。没有励磁损耗，发电机效率得以提高。处于直轴磁路的永磁体的磁导率很小，直轴电枢反应电抗 X_{ad} 较电励磁同步发电机小得多，因而固有电压调整率也比电励磁同步发电机小。

永磁同步发电机的缺点是：制成后难以调节磁场以控制其输出电压和功率因数；由于永磁材料和加工工艺的分散性，而且永磁材料，特别是铁氧体永磁和钕铁硼永磁的温度系数较大，导致发电机的输出电压随温度变化而偏离额定电压；采用稀土永磁后，目前价格较贵。随着电力电子器件性能价格比的不断提高，目前正逐步采用可控整流器和变频器来调节电压，上述缺点可以得到弥补。

永磁同步发电机的应用领域广阔。直驱式和半直驱式风力发电机，船用发电机，汽轮发电机用副励磁机，混合动力汽车用发电机，航空、航天用主发电机，汽车、拖拉机用发电机，离网型风力发电机，小型水力发电机，小型内燃发电机组等都广泛使用各种类型的永磁同步发电机。

永磁同步发电机按结构可分为内转子永磁同步发电机和外转子永磁同步发电机；按励磁方式可分为永磁同步发电机和混合励磁同步发电机；按原动机类型可分为风力永磁同步发电机、内燃机驱动永磁同步发电机和水力发电机等。

2　转子磁极结构

按永磁体磁化方向与转子旋转方向的相互关系，转子永磁体磁极可分为切向式、径向式、混合式和爪极式四种结构。

2.1　切向式转子磁极结构

切向式磁极结构（见图 5.5-1 和图 5.5-2）中，永磁体的磁化方向为转子圆周的切线方向，永磁体并联作用，由两个永磁体截面对气隙提供每极磁通，可提高气隙磁通密度，尤其在极数较多情况下更为突出。因此适合于极数较多且要求气隙磁通密度较高的永磁同步发电机。永磁体的磁化方向与磁通轴线接近垂直，且离气隙较远，漏磁较大。为减少永磁体向里侧漏磁，转轴衬套需由非磁性材料构成，或者采取空气隔磁措施。

由永磁体和极靴的固定方式不同，切向式转子磁极结构通常分为切向嵌入式结构（见图 5.5-1）和切向槽楔式结构（见图 5.5-2）。槽楔式结构中永磁体用槽楔固定，工艺和结构比较简单，但对高速运行的发电机，嵌入式的可靠性比槽楔式高。

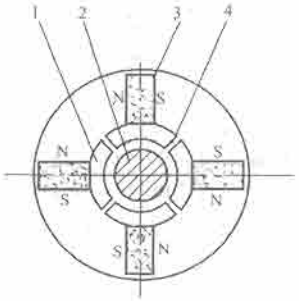


图 5.5-1　切向嵌入式转子磁极结构
1—空气槽；2—转轴；3—永磁体；4—隔磁桥

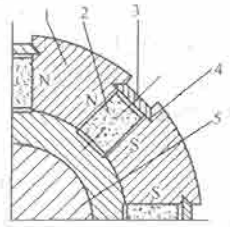


图 5.5-2　切向槽楔式转子磁极结构
1—极靴；2—永磁体；3—槽楔；4—非磁性衬套；5—转轴

2.2　径向式转子磁极结构

径向式转子磁极结构（见图 5.5-3～图 5.5-6）中，永磁体的磁化方向与气隙磁通轴线一致且离气隙较近，漏磁因数较切向式结构小。在一对极磁路中有两个永磁体提供磁动势，仅有一个永磁体截面提供每极磁通，故气隙磁通密度相对较低。径向式转子磁极结构中永磁体的形状主要有环形、星形、瓦片形和矩形四种。

环形永磁体（见图 5.5-3）的结构和工艺最为简单，可以直接浇铸或黏结在发电机转轴上，机械强度较高，可以在较高转速下运行。但是永磁材料的利用率不高。目前主要应用于微型和小功率发电机。

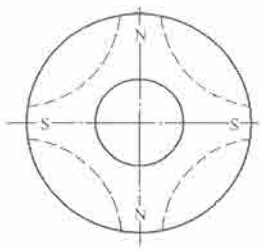


图 5.5-3　径向环形永磁体转子磁极结构

星形永磁体（见图 5.5-4）提高了永磁材料的利用率；可以直接浇铸或黏结在发电机转轴上，结构和工艺较为简单；极间通常采用铝合金浇铸，保证了转子结构的整体性且起阻尼作用，既可改善发电机的瞬

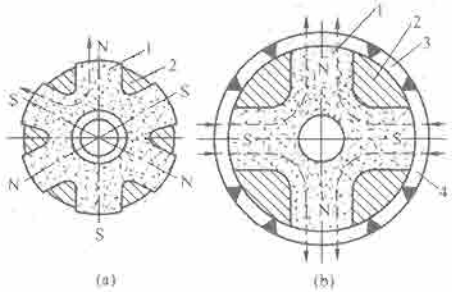


图 5.5-4　径向星形永磁体转子磁极结构
(a) 无极靴星形转子；(b) 有极靴星形转子
1—永磁体；2—非磁性材料；3—套环（非磁性材料段）；4—套环（磁性材料段）

态性能，又可提高永磁材料的抗去磁能力。但由于极间漏磁较大，充磁较为困难，容易造成永磁体的不均匀磁化，而且永磁体的形状较为复杂，永磁材料的磁性能偏低，因而发电机的容量受到限制。为了改善电动势波形，星形转子可以做成斜极。

径向星形永磁体转子磁极结构又分无极靴和有极靴两种[见图 5.5-4(a)和(b)]。在星形永磁体外圆装上软铁极靴后，使交轴电枢反应磁通经极靴闭合，减弱了电枢磁动势对永磁体的去磁作用。适当选择极靴的形状和尺寸，使气隙不均匀和极弧因数适宜，以改善空载气隙磁场波形和调节空载漏磁因数。但结构较为复杂，制造费时；交轴电枢反应对气隙磁场的作用大，使负载气隙磁场畸变严重；极靴使转子直径加大，导致发电机外径增大。

为在尽可能小的转子直径内放置尽可能大的永磁体，以提高气隙磁通密度，同时考虑到稀土永磁的矫顽力高，永磁体磁化方向长度可以小，近年来又多采用瓦片形永磁体[见图 5.5-5(a)、5.5-5(b)]和矩形永磁体(见图 5.5-6)。矩形永磁体的加工费用最低，磁化均匀，永磁体磁极的磁性能最好。瓦片形永磁体也可以用矩形永磁体条组成，以减少永磁体加工费用。调节瓦片形永磁体的宽度，也就是调节极弧因数，可以改善气隙磁场波形。

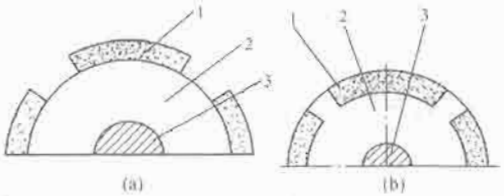


图 5.5-5 径向瓦片形永磁体转子磁极结构
(a) 表面凸出式；(b) 表面嵌入式
1—永磁体；2—转子铁心；3—转轴

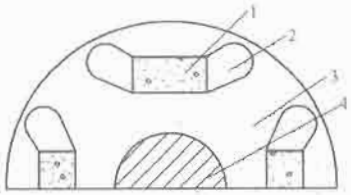


图 5.5-6 径向矩形永磁体转子磁极结构
1—永磁体；2—永磁体槽；3—转子铁心；4—转轴

对于图 5.5-2 所示的磁极结构按固定永磁体的方法不同分为套环式和绑扎式（图中未画出）。套环式磁极结构在性能、结构和工艺上与前面图 5.5-4（b）的结构相似，它既可由磁性材料和非磁性材料交替组合，用电子束焊接而成，也可由单一的非磁性材料制成，所需零件数减少，不需要电子束焊接，但计算气隙长度增大。而绑扎式磁极结构采用无纬玻璃丝带绑扎工艺，既防护永磁体表面，又使结构、工艺较为简单。

2.3 混合式转子磁极结构

混合式转子磁极结构是在径向和切向都放置永磁体[见图 5.5-7(a)、(b)]，它可以在一定的转子直径下提供更高的气隙磁通密度，或者可以在气隙磁通密度相同的情况下缩小转子体积。在切向永磁体和径向永磁体的尺寸、相互位置配合合理的情况下，漏磁因数可以比纯切向和径向结构大大减少，即在额定输出功率和转子尺寸相同的情况下，永磁体的用量减少。混合式转子结构较复杂，对转子槽和永磁体的加工精度要求高，制造费时。

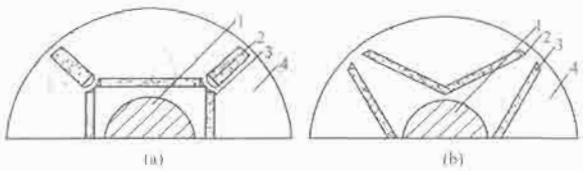


图 5.5-7 混合式转子磁极结构
(a) U形转子磁极结构；(b) V形转子磁极结构
1—转轴；2—永磁体槽；3—永磁体；4—转子铁心

2.4 爪极式转子磁极结构

爪极永磁发电机（见图 5.5-8）的爪极式转子通常由两个带爪的法兰盘和一个轴向充磁的圆环或圆柱形永磁体组成。两个带爪法兰盘的爪数相等（等于极数之半）。左右两个法兰盘对合，爪极相互错开，沿圆周均匀分布。永磁体夹在两个带爪法兰盘中间，一个法兰盘上的爪为 N 极，另一个法兰盘上的爪为 S 极，形成极性相异、相互错开的多极转子，法兰盘上的爪起极靴作用。图 5.5-9 所示为 18 极转子。

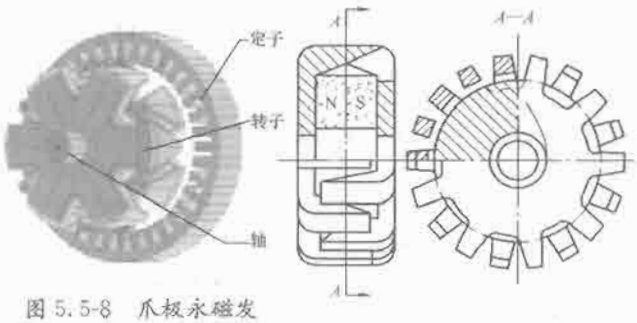


图 5.5-8 爪极永磁发电机定转子结构

图 5.5-9 爪极转子

为了避免磁分路，转轴应采用非磁性钢，如图 5.5-10(a)所示。如果转轴上套装非磁性材料(通常为黄铜)做的环，那么转轴可用磁性钢制造，如图 5.5-10(b)、(d)和(e)所示。在转子结构中还可以采用无轴孔的实心永磁体，转轴的左右两端焊接在法兰盘上，如图 5.5-10(c)所示。

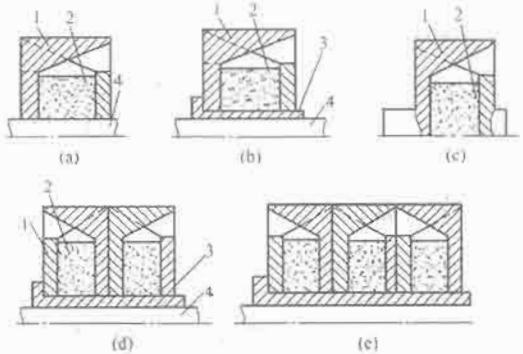


图 5.5-10 爪极式转子型式
(a) 非磁性转轴；(b) 磁性转轴；(c) 带轴柄的实心永磁体结构；(d) 双爪极转子；(e) 三爪极转子
1—带爪法兰盘；2—环形永磁体；
3—非磁性套筒；4—转轴

带爪的法兰盘通常用 10 号钢制造，或用钢板冲成，也可以采用粉末冶金直接压制成型。当磁通通过爪极时，爪极的每一截面通过的磁通不相等，爪尖最小，爪根最

多。因此爪极的截面积沿发电机轴向是变化的，爪尖部分的截面积最小，爪根部分最大。如果再考虑到爪极之间的漏磁通以及气隙磁场轴向的不均匀分布，则通过爪极各截面的磁通变化更加复杂。为了使爪极的磁阻和磁动势降最小，须使每一截面的磁通密度均匀相等，因此，必须设计沿轴向截面积不等的爪极形状。一般有等宽爪极、梯形爪极和正弦爪极三种。

等宽爪极，可近似假设气隙磁场沿轴向均匀分布，任一截面的磁通与相距爪尖的距离呈线性关系，为使每一截面的磁通密度相等、应使爪极的径向厚度与相距爪尖的距离呈线性关系。

梯形爪极的工艺比较复杂，可适当增长爪极的轴向长度，改善爪极磁通密度的均匀性和电动势波形。

如果梯形边设计为正弦曲线，即可得到正弦爪极。这种爪极除具有梯形爪极的优点外，在理论上还能得到正弦形的空载电动势波形，其电动势波形的正弦性与绕组节距无关，但这种爪极制造工艺复杂。

由于发电机的全部磁通（p 对极）轴向穿过圆环形永磁体，圆环形的截面积很大，而圆环的轴向长度 L_M 即为永磁体的磁化方向长度 h_M，所以永磁体的长细比 L_M/D_M 较小，适宜于采用 H_c 较大的永磁材料。为了减少发电机的径向尺寸，改善永磁体的磁性能，提高发电机的制造容量，可以采用双爪极[见图 5.5-10(d)]或三爪极[见图 5.5-10(e)]结构。

爪极转子的优点：永磁体形状简单、易加工、磁性能好、磁化均匀、利用程度高；爪极的存在使气隙磁场稳定，不会发生不可逆畸变；交轴电枢反应在爪极中闭合，爪极之间的漏磁较大，直轴电枢反应对永磁体的去磁作用较小，永磁体具有较大的抗去磁能力；爪极系统具有良好的阻尼作用；机械强度高，结构牢固。故特别适用于极数较多或频率较高的中频发电机。

爪极转子的缺点：爪极的结构复杂，制造困难费时；当发电机的转速较高或容量较大时，爪极所受的离心力很大，爪子可能向外弯曲，甚至根部发生断裂，需要采用专门的紧固措施，并适当增大发电机气隙；爪极和法兰盘所占转子体积的比例较大，在容量相同的情况下，发电机质量增加 20%～25%，不宜作为工频发电机；由于爪根部分有轴向磁通，爪极截面积又不宜过大，因此爪极部分的磁动势降较大；爪极必须采取整体结构，不能用叠片，爪极中涡流及磁滞损耗较大，导致效率下降。

此外，永磁同步发电机的磁极结构还有飞轮式外转子磁极结构，应用于内燃机、汽车、拖拉机和摩托车中，作为照明电源或点火用永磁发电机；混合励磁磁极结构由永磁体提供基本励磁磁通，由电励磁提供补充励磁磁通，以进行电压调节；静止永磁体的磁极结构中，永磁体安装在机座上，励磁磁通经过附加气隙和转子后，在工作气隙中建立气隙磁场。这些结构发电机的工作原理和电磁计算方法与前述基本结构的发电机相同。

3　运行性能和设计特点

永磁同步发电机的转子磁极结构既不同于电励磁同步发电机，又与永磁同步电动机的磁极结构相似而有区别。要想准确进行电磁性能计算，需要运用电磁场数值解法。

3.1　励磁电动势和气隙合成电动势

永磁同步发电机在空载运行时，空载气隙基波磁通在电枢绕组中产生励磁电动势 E_0(V)；在负载运行时，气隙合成基波磁通在电枢绕组中产生气隙合成电动势 E_δ(V)，计算公式与永磁电动机相同，为

$$E_0 = 4.44 f N K_{dp} \Phi_{\delta 0} K_\Phi$$

$$E_\delta = 4.44 f N K_{dp} \Phi_{\delta N} K_\Phi$$

式中，N 为电枢绕组每相串联匝数；K_{dp} 为绕组因数；K_Φ 为气隙磁通的波形系数；$\Phi_{\delta 0}$ 为每极空载气隙磁通，Wb；$\Phi_{\delta N}$ 为每极气隙合成磁通，Wb。

3.2　交、直轴电枢反应和电枢反应电抗

永磁同步发电机负载运行时，电枢绕组电流产生的电枢磁动势既影响气隙磁场的分布和大小，又影响永磁体的工作状态，影响程度与转子磁极结构有很大关系。

对于有极靴转子磁极结构，由于永磁体的磁导率很小，交轴电枢反应磁通主要经极靴闭合，如图 5.5-11 所示。当极靴有足够高度时，电枢反应对永磁体几乎没有影响。对气隙磁场的影响则与电励磁同步发电机基本相同，而且它的作用是可逆的，当负载去掉后，气隙磁场能回复到原来的形状。

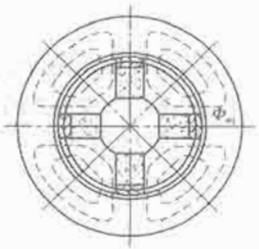


图 5.5-11　有极靴转子的交轴电枢反应磁通

直轴电枢磁动势所产生的直轴电枢反应磁通，一部分经过磁导率小的永磁体，另一部分经过高度饱和的隔磁磁桥，因而直轴电枢反应电抗比同规格电励磁同步发电机小得多。同时，永磁体、漏磁、磁路（隔磁桥）虽然影响永磁体的利用率，但也对直轴电枢反应起分流作用，改善永磁体的抗去磁能力。

对于无极靴转子磁极结构，交轴电枢反应磁通经永磁体闭合，如图 5.5-12 所示，使永磁体的一侧去磁，另一侧增磁，因而需要进行永磁体最大去磁工作点的校核计算，以防止产生永磁体的不可逆去磁。由于永磁体的磁导率低，这种结构的交轴电枢反应磁场比同规格的电励磁同步发电机小得多，因而交轴电枢反应电抗也小得多。

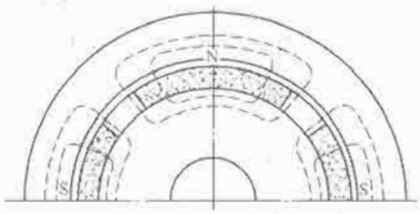


图 5.5-12　无极靴转子的交轴电枢反应磁通

由于永磁同步发电机的转子磁极结构多种多样，在分析电枢反应时，可根据需要针对具体的磁极结构，运用电磁场数值解法进行；也可按以下步骤进行近似计算。

计算交、直轴电枢反应电抗 X_{aq}、X_{ad} 时，应首先求得在电枢电流交、直轴分量 I_q、I_d 作用下电枢反应基波磁通密度幅值 B_{aq1}、B_{ad1}，然后用下式求得

$$X_{aq} = \frac{2}{\pi} l_{ef} \tau K_{dp} N \frac{B_{aq1}}{I_q} \tag{5.5-1}$$

$$X_{ad} = \frac{2}{\pi} l_{ef} \tau K_{dp} N \frac{B_{ad0} - B_{ad1}}{I_d} \tag{5.5-2}$$

式中，l_{ef} 为电枢计算长度，m；τ 为极距，m。

X_{aq} 也可以按下列近似公式估算。

对于有极靴转子磁极结构

$$X_{aq}=\frac{E_0}{I_N}\frac{F_{aq}}{F_\delta}K_{aq} \tag{5.5-3}$$

对于无极靴转子磁极结构

$$X_{aq}=\frac{E_0}{I_N}\frac{F_{aq}}{F_\delta}K_{aq}\frac{1}{1+\dfrac{b_M}{2\mu_r\delta K_\delta}} \tag{5.5-4}$$

式中，F_δ 为气隙磁位差，A；F_{aq} 为交轴电枢磁动势，A；K_{aq} 为交轴电枢磁动势折算系数。

对于有极靴均匀气隙

$$K_{aq}=\frac{\alpha_p\pi-\sin\alpha_p\pi+\dfrac{2}{3}\cos\dfrac{\alpha_p\pi}{2}}{4\sin\dfrac{\alpha_p\pi}{2}} \tag{5.5-5}$$

对于有极靴不均匀气隙，需用电磁场数值解法求得，或参照电励磁同步发电机的 K_{aq} 曲线。

X_{ad} 可以按下列公式计算

$$X_{ad}=\frac{E_0-E_d}{I_d}=\frac{4.44fNK_{dp}K_\Phi}{I_N\sin\psi_N}(\Phi_{\delta0}-\Phi_{\delta N}) \tag{5.5-6}$$

式中，ψ_N 为额定负载时的内功率因数角。

按额定数据 U_N、I_N、$\cos\varphi$ 和已求得的阻抗 R_1、X_q，利用相量图(图 5.5-13)，计算额定负载时的内功率因数角 ψ_N。

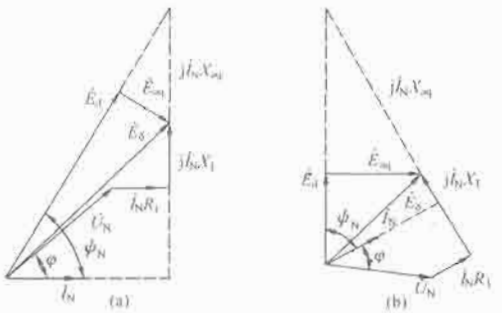


图 5.5-13 永磁同步发电机相量图
(a)电阻电感性负载；(b)电阻电容性负载

对于电阻电感性负载

$$\psi_N=\arctan\frac{U_N\sin\varphi+I_NX_q}{U_N\cos\varphi+I_NR_1} \tag{5.5-7}$$

对于电阻电容性负载

$$\psi_N=\arctan\frac{I_NX_q-U_N\sin\varphi}{U_N\cos\varphi+I_NR_1} \tag{5.5-8}$$

额定负载时每极直轴电枢磁动势

$$F_{ad}=0.45m\frac{NK_{dp}}{p}K_{ad}I_N\sin\psi_N \tag{5.5-9}$$

式中，K_{ad} 为直轴电枢磁动势折算系数，对于均匀气隙

$$K_{ad}=\frac{\alpha_p\pi+\sin\alpha_p\pi}{4\sin\dfrac{\alpha_p\pi}{2}} \tag{5.5-10}$$

对于不均匀气隙，需用电磁场数值解析法求得，或参考电励磁同步发电机的 K_{ad} 曲线。

3.3 固有电压调整率和降低措施

(1) 固有电压调整率

永磁同步发电机的固有电压调整率 ΔU 是指在保持额定转速的条件下，发电机额定电流、额定功率因数时的端电压与空载($I=0$)端电压之差与额定电压之比的百分值，即

$$\Delta U=\frac{E_0-U}{U_N}\times100\% \tag{5.5-11}$$

式中，U 为输出电压，V；U_N 为额定电压，V。

对于图 5.5-13(a)所示的电阻电感性负载，输出电压可按下式计算

$$U=\sqrt{E_d^2+I_N^2X_{aq}^2\cos^2\psi_N-I_N^2(R_1\sin\varphi-X_1\cos\varphi)^2}-I_N(R_1\cos\varphi+X_1\sin\varphi)$$

(2) 降低固有电压调整率措施

电压调整率的大小完全取决于发电机本身的基本特性，从上两式中可以看出，为了降低电压调整率，必须在给定 E_0 值的情况下增大输出电压 U，为此既要设法降低电枢反应引起的去磁磁通量，又要减小电枢电阻 R_1 和漏抗 X_1。

1) 为了降低电枢反应引起的去磁磁通量，首先要增大永磁体的抗去磁能力，即增大永磁体的抗去磁磁动势，为此应选用矫顽力 H_c 大、回复磁导率 μ_r 小的永磁材料；同时增大永磁体磁化方向长度，使工作点提高，削弱电枢反应的影响。如图 5.5-14 所示，当 $h_{M1}>h_{M2}$ 时，$\Delta\Phi_1$ 明显小于 $\Delta\Phi_2$。其次，需减少电枢绕组每相串联匝数和增加转子漏磁导以削弱电枢反应对永磁体的去磁作用。为此应选用剩磁密度 B_r 大的永磁材料；并且应增加永磁体提供每极磁通的截面积，这时磁通明显增加，可以有效地减少每相串联匝数。

2) 为了减小定子漏抗 X_1，需要选择宽而浅的定子槽形；减少电枢绕组每相串联匝数(但要注意减小电枢绕组每相串联匝数会使短路电流增大)；缩短绕组端部长度；适当加大气隙长度；加大长径比等。

3) 为了减小电枢电阻，需减少电枢绕组每相串联匝数、增大导体截面积或减小绕组端部长度。

在上述措施中，都将导致耗用更多的永磁材料，所以在满足规定性能指标的前提下，应合理地选择各参数，以便减少永磁材料的用量。

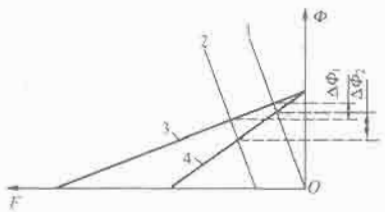


图 5.5-14 不同磁化方向长度的永磁体工作图
1—空载时的磁导线；2--负载时的磁导线；3—磁化方向长度为 h_{M1} 的 $\Phi-F$ 曲线；4—磁化方向长度为 h_{M2} 的 $\Phi-F$ 曲线

3.4 短路电流倍数计算

永磁同步发电机的短路状态分为稳态短路和瞬态(冲击)短路。瞬态短路电流通常大于稳态短路电流，且计算比较复

杂。工程上常常先求出稳态短路电流倍数 I_k^*，然后乘以经验修正系数后得出瞬态短路电流倍数。

由永磁同步发电机稳态短路时($U=0$)的相量图(见图 5.5-15)可以导出稳态短路电流倍数 I_k^*。

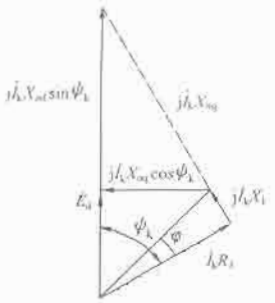


图 5.5-15　永磁同步发电机稳态短路时相量图

$$I_k^* = \frac{4.44(\lambda_n-\lambda_\sigma)fNK_{dp}K_\Phi B_r A_m}{4.44fNK_{dp}(1+\lambda_\sigma)\lambda_n f K_\Phi B_r A_m + (1+\lambda_n)I_N\sqrt{R_1^2+X_1^2-X_{aq}^2\cos^2\psi_k}} \tag{5.5-12}$$

式中，ψ_k 为稳态短路时的内功率因数角，$\psi_k = \arctan X_q / R_1$。

短路电流对永磁体去磁作用的大小，除与短路电流倍数有关外，还取决于转子磁极结构型式和空载漏磁因数的大小。

对于有软铁极靴、极间浇铸非磁性材料、转子上安放阻尼笼等有阻尼系统的磁极结构，瞬态短路电流对永磁体的去磁作用大大减弱，并接近于稳态短路电流的去磁作用。

对于无极靴转子磁极结构，由于永磁体的电阻率很大，几乎没有阻尼作用，瞬态短路电流的去磁作用很大。

为避免永磁体在发电机短路过程中发生不可逆退磁，需进行最大去磁工作点(b_{mh}、h_{mh})的校核计算。应保证此工作点在最高工作温度时(铁氧体为最低环境温度时)处于回复线的线性段，或者说应高于回复线的拐点(b_k、h_k)。

3.5　电动势波形

工业生产对同步发电机的电动势波形的正弦性有严格的要求，实际电动势(通常指空载线电压)波形与正弦波形之间的偏差程度用电压谐波电压因数(HVF)来表示。

HVF 值按下式计算

$$\mathrm{HVF} = \sqrt{\sum \frac{U_n^2}{n}} \tag{5.5-13}$$

式中，U_n 为谐波电压的标幺值(以额定电压 U_N 为基值)；n 为谐波次数，通常取谐波次数 $n \leqslant 13$ 已足够。

为改善电动势波形，除采用分布绕组、短距绕组、正弦绕组、斜槽等措施外，还应改善气隙磁场波形，它不但与气隙形状和极弧因数 α 有关，还与有无软铁极靴和稳磁处理方法有关。

微型和小功率永磁同步发电机如对电压波形要求不高时，通常采用均匀气隙。空载气隙磁场可近似地看成宽度为 $\alpha_i\tau$、幅值为 B_δ 的矩形波。当发电机容量较大或对电压波形要求严格时，需对极靴形状进行加工，使气隙不均匀，并选用合适的极弧因数 α_p，从而使气隙磁场波形分布尽可能接近正弦。气隙磁通波形因数需运用电磁场数值解法求出或参照电励磁同步发电机的相应曲线。图 5.5-16 示出某台永磁同步发电机的气隙磁场波形和电动势波形。

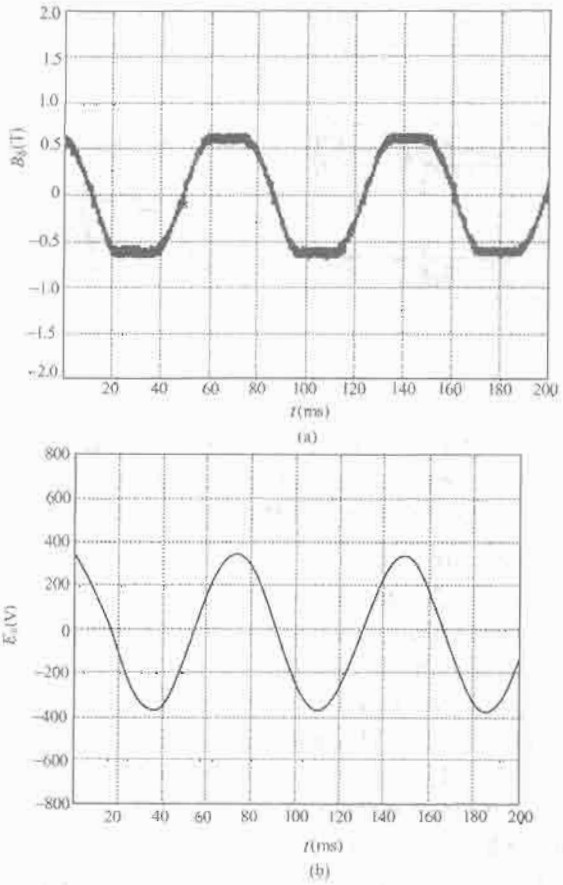


图 5.5-16　气隙磁场波形和电动势波形
(a)空载气隙磁场波形；(b)线电动势波形

4　混合励磁同步发电机

永磁同步发电机制成后，磁场不能调节，可采用永磁体励磁与电励磁相结合的方式，通过电励磁绕组来调节气隙磁场，使发电机输出电压稳定，这就是混合励磁同步发电机。

4.1　结构和特点

混合励磁同步发电机气隙磁场包括两部分：主要部分由永磁体建立，称为永磁主磁场部分；电压调节所需要的磁场变化部分由辅助的电励磁绕组来实现，称为辅助磁场或电励磁磁场部分，两部分共有一套电枢绕组，电励磁磁场和永磁磁场的磁路基本上是独立的。

图 5.5-17 和图 5.5-18 为两种典型的混合励磁同步发电机结构。在图 5.5-17 中，定子铁心被定子环形电励磁绕组 6 分成两部分，且由其外侧的定子背轭 2 在机械上和电磁上相连接；每段转子表面交错排列着永磁体和软铁磁极 8，并在软铁磁极端附加一永磁体磁极 9；两段的 N、S 极永磁体也相互错开，且保证在同一个线圈下的永磁体的磁化方向相同。在两段转子铁心之间加一导磁套筒起轴向导磁作用。

调节直流励磁电流的大小和方向，合成气隙磁通密度就会相应地增大或减小。当永磁体提供的主磁通较大，即发电机的发电电压高于额定电压时，通过调节励磁电流的方向，产生的电励磁磁场的方向，左侧从定子到转子，右侧从转子到定子，即使软铁磁极 8 同永磁体磁极 9 反极性，这时辅助磁场为去磁性质，然后调节励磁电流的大小使发电机的发电电压稳定在额定值。同样，当永磁体提供的主磁通较小，即发电机的发电电压低于额定电压时，则改变励磁电流的方向，产生的电励磁磁场的方向相反，即使软铁磁极 8 同永磁

体磁极9同极性，这时辅助磁场起增磁作用，然后调节励磁电流的大小，使发电机的发电电压稳定在额定值。

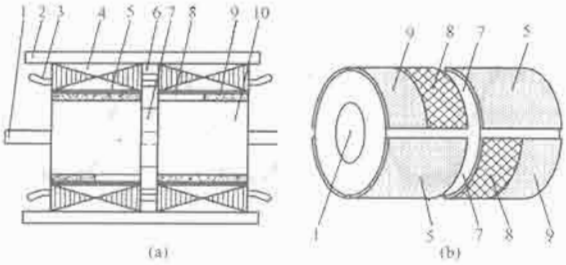


图 5.5-17 一种典型混合励磁同步发电机结构
(a) 轴向剖面图；(b)转子
1—转轴；2—背轭；3—定子绕组；4—定子铁心；
5—永磁体；6—电励磁绕组；7—导磁套筒；
8—软铁磁极；9—永磁体磁极；10—转子铁心

该结构的优点是：

1)实现电励磁无刷化，可靠性高。

2)电励磁可以进行双向调节，且仅需很小的励磁电流就保证稳定的输出电压，效率高，温升低。

3)永磁体和铁磁极长度比例可以任意调节，便于实现电机结构的优化设计，从而能满足各种应用场合的需要。

如图 5.5-18 所示的混合励磁同步发电机的气隙磁场由永磁主磁场部分和辅助电励磁磁场部分组成，两部分共有一个电枢绕组。定子结构和传统的电励磁发电机定子结构相同。主磁场的转子结构和普通永磁同步发电机结构相同。电励磁磁场部分由部件2～7组成，电励磁绕组支架的内圆筒通过气隙和转子轴配合，支架底部通过非导磁隔板固定在定子端盖上，支架外圆筒通过气隙和水平磁极配合，励磁绕组则安放在内外圆筒之间的空间里。支架材料为导磁材料，作用是构成电励磁的一部分磁路和固定励磁绕组。图中的水平磁极和垂直磁极是电磁磁路的一部分，构成辅助电励磁部分的磁极，两种磁极都通过一块非导磁的连接板与主发电机转子固定在一起。

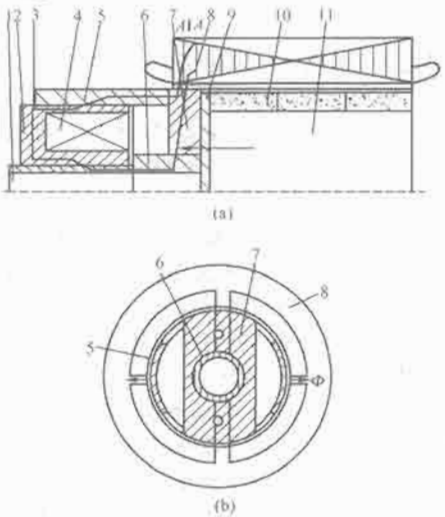


图 5.5-18 另一种混合励磁同步发电机结构
(a) 轴向剖面图；(b)径向剖面图
1—电机转轴；2—非导磁隔板；3—电励磁绕组支架；4—电励磁绕组；5—水平磁极；6—导磁轴套；7—垂直磁极；8—定子铁心；9—隔磁板；10—永磁体；11—转子铁心

该种结构的特点是：

1) 实现了无刷化，免维护。

2) 辅助电励磁部分的损耗小，具有永磁发电机高效率的特点。

3) 磁场调节方便，解决了永磁发电机电压调节难的问题。

4) 工艺结构复杂，机加工精度要求高。

4.2 设计特点

4.2.1 空载永磁电动势的确定

空载永磁电动势是指发电机在同步转速下空载运行，电励磁电流为零，而由永磁体磁场在电枢中感应产生的电动势。空载永磁电动势的确定直接影响电励磁的调节能力，进而影响发电机的效率和功率密度。如图 5.5-19 所示发电机在不同空载永磁电动势时外特性曲线(实际外特性曲线不是直线)。当负载电流变化时，为了保持额定输出电压的稳定，需要通过调节电励磁绕组中的励磁电流。如果发电机的外特性曲线为线3，从图中可以看出，发电机的空载电动势正好等于额定电压，随着负载电流的增大，为保持发电机输出端的电压恒定，需要调节的最大电压降是 AC 段。若提高发电机的空载电动势，使外特性曲线为线1，需要调节的范围为 $E_{01} \sim U_N$。如果外特性曲线为线2，则发电机在空载和负载时都需要调节电励磁，但最大调节范围仅为 AB 段。而电压调节范围越大，需要励磁电流越大，相应的电励磁绕组槽的尺寸大，发电机的重量就会增加，从而导致功率密度降低。进一步考虑温度的影响，在同一电枢电流条件下，发电机热态的电动势要比冷态低，如图 5.5-20 所示。因此，为了减少励磁电流，降低电机温升，理想的发电机的外特性可按线4设计，使发电机的输出电压 U 在负载为 $(1/2 \sim 2/3)P_N$ 时等于额定电压 U_N。

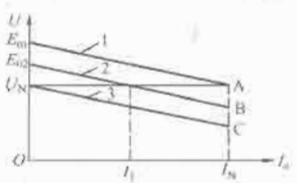


图 5.5-19 发电机的外特性

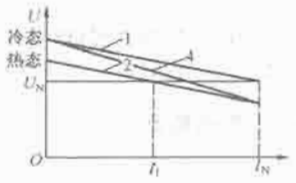


图 5.5-20 温度对发电机外特性的影响

4.2.2 磁极形状的优化设计

为了获得低的电压谐波电压因数，同步发电机的磁极通常采用两种结构，一种是偏心圆弧结构，如图 5.5-21 所示，使空气隙由 δ 连续增大到 δ_{max}。另一种就是采用图 5.5-22 所示的削角结构，通过不同的 θ_1 和 θ_2 角来改善气隙磁场波形。

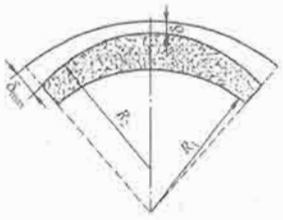


图 5.5-21 偏心圆弧结构

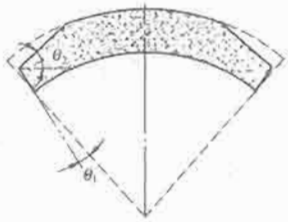


图 5.5-22 削角结构

4.2.3 电励磁绕组槽尺寸确定

图 5.5-17 所示混合励磁同步发电机的电励磁绕组槽的几何模型如图 5.5-23 所示。

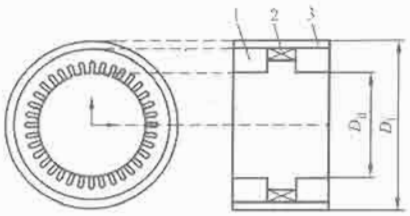


图 5.5-23 混合励磁发电机定子结构尺寸
1—定子铁心；2—电励磁绕组；3—背轭

电励磁绕组槽的面积为

$$A_{dc}=B_{g-inn}\frac{2\delta A_{dc-cond}}{\mu_0 I_{dc}K_{Cu}} \tag{5.5-14}$$

式中，B_{g-inn} 为软铁磁极表面的气隙磁通密度，T；$A_{dc-cond}$ 为一根导线的面积；K_{Cu} 为电励磁绕组的填充系数；I_{dc} 为励磁电流，A。

4.2.4 典型产品数据

目前国内开发的混合励磁发电机的技术数据见表 5.5-1。

表 5.5-1 典型产品技术数据

名 称	数 据
额定功率(kW)	7.5
额定电压(V)	400
相数	3
频率(Hz)	50
额定转速(r/min)	1500
定子冲片外径(mm)	175
定子冲片内径(mm)	110
定子铁心长(mm)	182
转子铁心长(mm)	195
气隙(mm)	0.8
效率(%)	92.1
稳态电压调整率(%)	0.75
HVF	0.0064
重量(kg)	60

5 永磁风力发电机设计特点

小型永磁风力发电机都是离网型的，主要用在边远山区、海岛等用户分散、用电负荷小的地区。对于大、中型永磁风力发电机，主要是并网运行。

永磁风力发电机可以实现低速大转矩，因此可以省去增速箱而实现风轮直接驱动，提高了系统的整体效率和可靠性。

5.1 电磁负荷选择

随着风速的增加，风力发电机散热条件也大大改善。因此，永磁风力发电机可选取较高的热负荷 AJ 值，但其数值根据风速不同而不同。磁负荷的选择，与一般电机相同。

5.2 定子齿槽的确定

基于该类发电机的电负荷较高，铜损耗大，设计时，在保证足够的机械强度及磁通密度允许的情况下，应尽量减小定子齿宽和轭厚，以扩大槽面积，增大定子绕组导线面积，降低铜损耗，提高发电机的效率。同时可采用 4/6、8/9 或 11/12的极槽比，以缩短绕组端部，降低铜损耗。

5.3 最大起动阻力矩的计算及减小措施

(1) 最大起动阻力矩的计算

为提高风能的利用率，在风力发电机中需要考核最大起动阻力矩，由于永磁发电机永磁体的存在，其值要比异步发电机和同步电励磁发电机的大，计算方法也不同，根据理论推导和试验验证，永磁发电机的最大起动阻力矩可用式(5.5-15)和式(5.5-16)进行计算。

切向式磁极结构

$$T_{QmF}=\pi R^2 l_{ea}\alpha_i\frac{l_M}{\delta}C(BH)_{max} \tag{5.5-15}$$

径向式磁极结构

$$T_{QmF}=\pi R^2 l_{ea}\alpha_i\frac{l_M}{\delta+h_M}C(BH)_{max} \tag{5.5-16}$$

式中，R 为转子半径，m；l_{ea} 为永磁材料轴向长度，m；l_M 为一对磁极闭合磁路的平均长度，m；δ 为气隙长度，m；h_M 为永磁体的磁化方向厚度，m；$(BH)_{max}$ 为永磁材料的最大磁能积；α_i 为计算极弧因数；C 为永磁材料的最大磁能积在静态时磁能利用经验系数，取 0.12～0.15。

(2) 减小措施

1) 采用分数槽绕组。分数槽绕组的每极每相槽数 $q=Z_s/2mp=a+c/d$，每极槽数 $Q=Z_s/2p=A+C/D$。

式中，Z_s 为定子槽数；m 为相数；p 为发电机极对数；A、a 为整数；c/d、C/D 为不可约分的分数。

理论和实践证明，D 越大，发电机的起动阻力矩越小。

2) 定子斜槽。工艺上比较容易实现，但效果不明显，而且如果斜槽距离太大，发电机的电气性能会受影响。

3) 在工艺上，保证电机结构件的加工精度和整个电机的装配精度以避免由于工艺问题造成的起动阻力矩加大。

5.4 典型产品数据

国内部分产品数据见表 5.5-2（FD 系列）和表 5.5-3（YF 系列）。

表 5.5-2 FD 系列永磁同步发电机产品数据

数据/型号 项目	FD1.6 -50	FD2 -100	FD2 -150We	FD2.1 -200	FD2.5 -300	FD5.6 -500	FD5.6 -1000
额定功率(W)	50	100	150	200	300	500	1000
发电机额定电压(V)	12	28	28	28	42	42	24/48
发电机额定转速(r/min)	400	400	450	450	440	480	350

表 5.5-3 YF 型永磁风力发电机主要技术指标

项目/型号	功率(kW)	额定电压(V)(整流后直流电压)	额定转速(r/min)	重量(kg)
YF-0.1G	0.1	14	620	8
YF-0.1D	0.1	14	400	10
YF-0.2G	0.2	28/14	540	12
YF-0.2D	0.2	28/14	400	14
YF-0.3G	0.3	28	500	15
YF-0.3D	0.3	28	400	17
YF-0.5G	0.5	42/28	450	22
YF-0.5D	0.5	42/28	360	24
YF-1.0G	1.0	56	400	42
YF-1.0D	1.0	56	300	46
YF-2.0G	2.0	115	360	70
YF-2.0D	2.0	115	280	80
YF-3.0G	3.0	230/115	240	195
YF-5.0	5.0	230	200	240
YF-7.5	7.5	230	170	330
YF-10	10	230	150	430

第6章 永磁无刷电动机

1 概述

永磁无刷电动机是随着半导体电子技术发展而出现的新型机电一体化产品，是现代电子技术（包括电力电子、微电子技术）、控制理论和电机技术相结合的产物。

1917年，Bolgior提出了用整流管代替有刷直流电动机的机械换向，从而诞生了无刷电动机的基本思想。1955年，美国的D. Harrison等首次申请了用晶体管换相线路代替直流电动机的机械电刷的专利，标志着现代永磁无刷电动机的诞生。

1970年以来，随着电力半导体工业的飞速发展，许多新型全控半导体功率器件的相继问世，加之高磁能积永磁材料，如钐钴（SmCo）、钕铁硼（NdFeB）等陆续出现，为永磁无刷电动机的应用奠定了基础。在1978年汉诺威贸易博览会上，推出了MAC永磁无刷电动机及其驱动器，引起了世界各国的关注，随即在国际上掀起了研制和生产永磁无刷电动机系统的热潮。这也标志着永磁无刷电动机走向实用阶段。

永磁无刷电动机的功率范围很宽，小的只有几瓦、几十瓦，大的几十千瓦、几百千瓦乃至兆瓦。永磁无刷电动机在要求高精度控制和高可靠性的场合，如航空、航天、数控机床、加工中心、机器人、电动汽车等方面都获得了广泛应用，提高了设备和装备的快速性、可靠性、可维护性和小型化，满足了各种伺服控制系统要求。如航天飞机升降副翼用的12.6kW、9000r/min稀土永磁无刷电动机，效率为95%，重量7.65kg。舰船用100kW的稀土永磁无刷电动机，在线圈端侧装入逆变器，总重只有28kg。

永磁无刷电动机与直流伺服电动机相比，具有以下特点：

1）经电子控制获得各种运行特性，有较好的可控性，宽调速范围。

2）由于没有电刷和换向器，无火花和磨损，可靠性高、寿命长、无需经常维护。

3）有较高的效率。

4）必须有电子控制部分，总成本比直流电动机的高。

永磁无刷电动机的控制模式分为方波驱动和正弦波驱动。方波驱动时，其驱动电流为近似矩形波，电动机反电动势要求为梯形波；正弦波驱动时，其驱动电流为正弦波，电动机反电动势要求为正弦波。前者常称为永磁无刷直流电动机，后者称为永磁交流伺服电动机。就其位置传感器和控制电路而言，方波驱动相对简单、廉价，是目前绝大多数永磁无刷电动机的驱动方式。正弦波驱动需要高分辨率位置传感器，如旋转变压器、光电编码器，控制电路相对复杂，成本较高。正弦波驱动借助高分辨率位置传感器，以强制提供正弦波相电流为特征，与方波驱动相比，具有转矩波动低、运行平滑、噪声小，可利用超前角技术实现弱磁控制，拓宽调速范围等优点。

永磁无刷电动机技术发展呈现以下趋势：

1）产品向专用化、多样化方向发展。采用电动机优化设计技术，合理选择参数，减少转矩波动和噪声，扩大调速范围；分数槽技术的应用日益增多；通过结构和工艺革新，采用多极集中绕组，拼块式或铰链式电枢冲片，提高槽利用率，以生产自动化、规模化，向低成本、低价格方向发展；高性能永磁材料的采用，提高了效率，节省了材料，缩小了体积，减轻了重量；驱动、通信等部件都融合在电动机内部，形成更为紧密的机电一体化产品。

2）高效率、高性能驱动控制技术的研究不断深入，正弦波控制方式更被关注；智能功率模块高度集成，集功率器件、前级驱动、保护电路和控制电路于一身，整体性能更加优越。

3）无位置传感器控制技术逐步完善。

4）控制方式向数字化方向发展。

2 构成及工作原理

2.1 系统构成

永磁无刷电动机系统由永磁无刷电动机、传感器（传感技术）、无刷电动机驱动器构成，如图5.6-1所示。位置传感器检测转子磁极信号，控制器对此信号进行逻辑处理，并产生相应的开关信号，开关信号以一定的顺序触发驱动器中的功率开关器件，将电源功率以一定的逻辑关系分配给电动机各相绕组，使电动机旋转并产生连续的转矩。

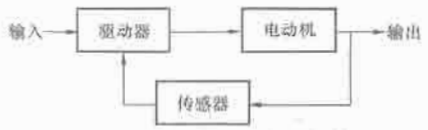


图5.6-1 永磁无刷电动机系统的组成

永磁无刷电动机系统有4种基本运行方式：开环运行、转矩控制、速度控制和位置控制（见图5.6-2～图5.6-5）。

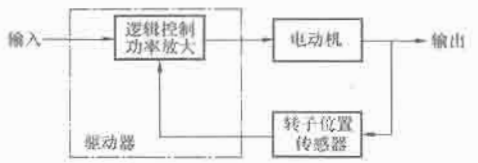


图5.6-2 开环运行框图

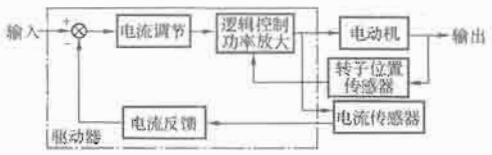


图5.6-3 转矩控制系统框图

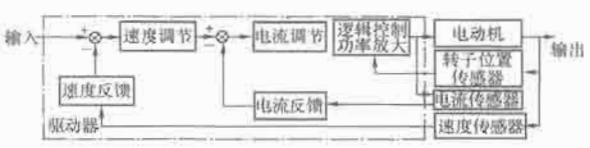


图5.6-4 速度控制系统框图

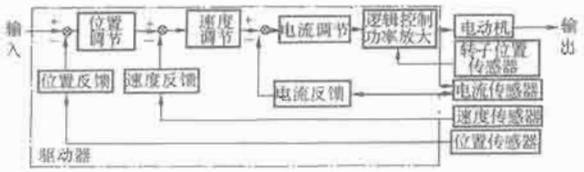


图 5.6-5　位置控制系统框图

2.1.1　电动机结构

永磁无刷电动机的转子为永磁组件，定子为多相对称绕组电枢。永磁无刷电动机在实际使用中，有时为了满足某些机械的特殊技术要求，把定子电枢做在里面，而把带永磁体的转子做在外面。通常把这种结构称为外转子结构（或内定子结构）。

内转子结构和外转子结构分别示于图 5.6-6 和图 5.6-7。永磁无刷电动机的外转子结构和内转子结构具有各自的优缺点。通常外转子结构电动机转动惯量较大，零部件数目较多，内转子结构电动机转动惯量较小，零部件数目较少。

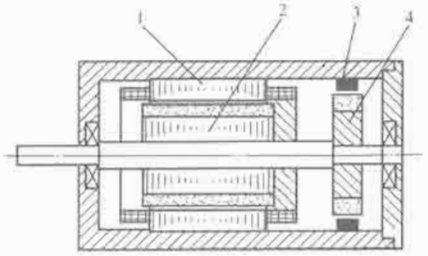


图 5.6-6　内转子式永磁无刷电动机的结构
1—定子组件；2—转子组件；
3—传感器定子；4—传感器转子

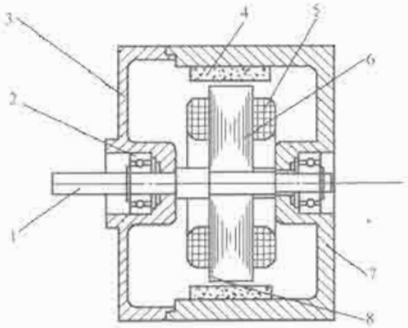


图 5.6-7　外转子式永磁无刷电动机的结构
1—转轴；2—轴承；3—端盖；4—永磁体；5—定子绕组；6—定子铁心；7—机壳；8—霍尔元件

永磁无刷电动机还可提供分装式结构电动机。分装式结构为无壳体或无框架。制造厂根据用户的具体要求，只提供电动机的有关零部件，由用户装配。这样，可以消除联轴器和某些机械构件的重复，避免了机械谐振，产品具有结构紧凑、系统的频带更宽和刚度更高等优点。

2.1.2　位置传感器

位置传感器的作用是检测转子磁极相对于定子绕组的位置，为驱动器提供正确的换相信息。

转子位置传感器的种类有接近开关、光电编码器、正余弦旋转变压器、霍尔元件、磁/电变换元件等。常用霍尔元件、光电编码器等检测转子位置，而正弦波驱动时则采用正余弦旋转变压器、光电编码器等高精度位置传感器。系统也可不采用位置传感器，通过检测和计算与转子位置有关的物理量而间接地获得转子位置信息，主要有反电动势检测法、续流二极管工作状态检测法和瞬时电压方程法等。

2.1.3　驱动器

驱动器是接受控制指令，对电动机的转矩、速度、转子位置进行控制的电气装置。

驱动器的主要功能是：

1）对转子位置传感器信号、PWM 调制信号，正、反转及停车信号进行逻辑综合，为驱动电路提供各开关管的斩波信号和选通信号，实现电动机的正、反转及停车控制。

2）产生 PWM 信号，使电动机的电压随给定速度信号自动变化，实现开环控制。

3）实现电动机系统的闭环控制，获得较好的动态和静态性能。

4）实现短路、过电流、过电压、过热和欠电压等故障保护功能。

驱动器按其控制电路和软件的实现方式可分为模拟量控制、数字模拟混合控制和全数字化控制；按其驱动方式可分为方波驱动和正弦波驱动。

2.2　工作原理

2.2.1　方波驱动永磁无刷电动机工作原理

以两相导通星形三相六状态运行说明方波驱动永磁无刷电动机的工作原理。如图 5.6-8 所示为两极方波驱动三相永磁无刷电动机，定子电枢绕组为三相星形联结，位置传感器与电动机同轴连接。控制电路对位置信号进行逻辑变换后产生驱动信号，控制逆变器的功率开关管，使电动机的各相绕组按一定的顺序工作。

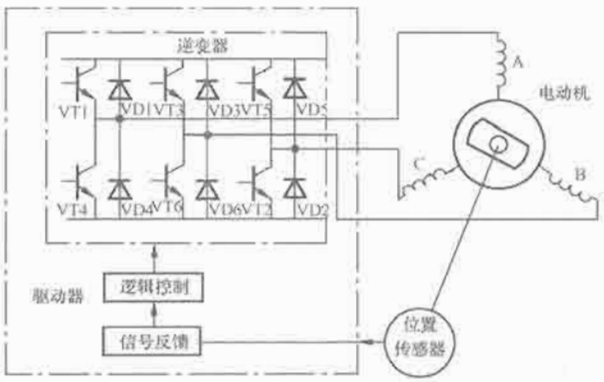


图 5.6-8　两极方波运行三相永磁无刷电动机

当转子旋转到图 5.6-9（a）所示的位置时，转子产生磁动势 F_r，转子位置传感器输出的信号经控制电路逻辑变换后驱动逆变器，使 VT1、VT6 导通，即 A、B 两相绕组通电，电流从电源的正极流出，经 VT1 流入 A 相绕组，再从 B 相绕组流出，经 VT6 回到电源的负极。电枢绕组在空间产生的磁动势 F_a，定、转子磁场相互作用，使电动机的转子顺时针转动。

当转子在空间转过 60°电角度，转子产生的磁动势 F_r 到达图 5.6-9（b）所示位置时，转子位置传感器输出的信号经控制电路逻辑变换后驱动逆变器，使 VT1、VT2 导通，A、C 两相绕组通电，电流从电源的正极流出，经 VT1 流入 A 相绕组，再从 C 相绕组流出，经 VT2 回到电源的负极。电枢绕组在空间产生的磁动势 F_a，此时定、转子磁场相互作用，使转子继续顺时针转动。

依此类推，当转子到达图 5.6-9（c）～图 5.6-9（f）所示位置时，转子位置传感器输出的信号经控制电路逻辑变换后驱动逆变器，使 VT3、VT2，VT3、VT4，VT5、VT4，VT5、VT6 分别导通，与此相对应，电枢绕组的导通顺序为：B、C→B、A→C、A→C、B，完成一个工作循环。在此期间，转子始终受到顺时针方向的电磁转矩作用，沿顺时针方向连续旋转。

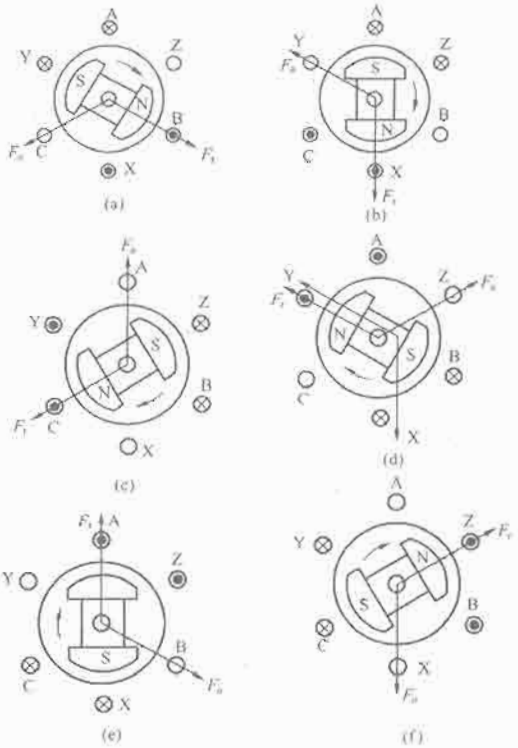


图 5.6-9 永磁无刷电动机工作原理示意图

(a) VT1、VT6 导通，A、B 相通电；(b) VT1、VT2 导通，A、C 相通电；(c) VT3、VT2 导通，B、C 相通电；(d) VT3、VT4 导通，B、A 相通电；(e) VT5、VT4 导通，C、A 相通电；(f) VT5、VT6 导通，C、B 相通电

转子在空间每转过 60°电角度，定子绕组就进行一次换流，定子合成磁场的磁状态就发生一次跃变。可见，电动机有 6 种磁状态，每一状态有两相导通，每相绕组的导通时间对应于转子旋转 120°电角度。把永磁无刷电动机的这种工作方式称为两相导通星形三相六状态运行。这是三相方波运行永磁无刷电动机最常用的一种工作方式。

2.2.2 正弦波驱动永磁无刷电动机的工作原理

正弦波驱动要求电动机安装高分辨率位置反馈装置，能提供接近正弦波的位置信息，以强制提供正弦波相电流为特征的电子换相方法。三相绕组正弦波电流产生旋转磁场，与转子磁场作用，使电动机转子旋转。通过矢量和相位控制，使电动机的反电动势和电流相位相同，A、B、C 三相绕组的反电动势和相电流可以表示如下

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2}E\sin\theta \\ e_b = \sqrt{2}E\sin\left(\theta-\dfrac{2}{3}\pi\right) \\ e_c = \sqrt{2}E\sin\left(\theta+\dfrac{2}{3}\pi\right) \end{cases} \tag{5.6-1}$$

$$\begin{cases} i_a = \sqrt{2}I\sin\theta \\ i_b = \sqrt{2}I\sin\left(\theta-\dfrac{2}{3}\pi\right) \\ i_c = \sqrt{2}I\sin\left(\theta+\dfrac{2}{3}\pi\right) \end{cases} \tag{5.6-2}$$

式中，e_a、e_b、e_c为相反电动势；i_a、i_b、i_c为相电流；E 为相反电动势有效值；I 为相电流有效值；θ 为转子转过的角度（电气角）。

电动机的电磁功率可表示为

$$P_{em} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = 3EI \tag{5.6-3}$$

输出电磁转矩为

$$T_e = \frac{P_{em}}{\Omega} = 3\frac{E}{\Omega}I \tag{5.6-4}$$

式中，Ω 为机械角速度。

对一台制造好的电动机，E/Ω 为定值。上式表明，正弦波驱动的无刷电动机具有线性的转矩/电流特性，而且瞬态电磁转矩 T_e 与转角 θ 无关，理论上转矩波动为零。

正弦波驱动是一种高性能的控制方式，电流是连续的，理论上可获得与转角无关的恒定输出转矩，实际上可以做到 3%以下的转矩波动，有良好的低速平稳性，同时也大大改善了在中、高速大转矩时的特性，但它对电动机设计、转子位置传感器提出了更高要求，驱动器电路更加复杂，成本更高。

方波驱动与正弦波驱动相比较的优点是：① 转子位置传感器结构比较简单，成本较低；② 位置信号只需进行逻辑处理，伺服驱动器成本较低；③ 电动机有较高的利用率。缺点是：① 转矩波动较大；② 高速工作时矩形波电压发生畸变，会引起转矩的下降；③ 定子磁场非连续旋转造成附加铁损耗增加。

2.2.3 数学模型

永磁无刷电动机的转子上安装永久磁体，定子上嵌有多相电枢绕组，其极数与转子相同。定子多相电枢绕组通过开关电路连接到电源上，在气隙中产生旋转磁场。定子多相绕组与不同类型的外部电源连接，电动机的分析方法也有所不同。

为了便于分析，假定：

1）电枢绕组完全对称，定子电流、转子磁场分布皆对称。

2）忽略电枢反应的影响。

3）电枢绕组在定子内表面均匀连续分布。

4）磁路不饱和，不计涡流和磁滞损耗。

（1）方波驱动永磁无刷电动机的数学模型

由于方波永磁无刷电动机的励磁磁场、反电动势及电枢电流波形均非正弦波，因而不需进行坐标变换，直接利用电动机的三相变量来建立数学模型不仅方便，也可获得较准确的结果。

以两相导通三相六状态运行永磁无刷电动机为例，其定子三相绕组的电压方程为

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \tag{5.6-5}$$

式中，R 为电枢绕组电阻，Ω；L_a、L_b、L_c 分别为三相绕组自感，H；M_{ab} 为 A 相和 B 相绕组间的互感，H；其他亦然，且有 $M_{ab}=M_{ba}$，$M_{ac}=M_{ca}$，$M_{bc}=M_{cb}$。

电磁功率可表示为

$$P_{em} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \tag{5.6-6}$$

电磁转矩可表示为

$$T_e = \frac{P_{em}}{\Omega} \tag{5.6-7}$$

运动方程为

$$T_e - T_L - B\Omega = J\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t} \tag{5.6-8}$$

式中，T_e 为电磁转矩；T_L 为负载转矩；B 为阻尼系数；Ω 为机械角速度；J 为转动惯量。

（2）正弦波运行永磁无刷电动机数学模型

在这种情况下，开关电路的导通触发与转子磁场位置无关，是方波驱动永磁无刷电动机最主要的区别。定、转子间电磁相互作用产生的力和转矩可利用同步电机双反应旋转磁场理论，将对称三相 a、b、c 坐标轴系变换成 d、q、0 坐标轴系来分析。以时域数学模型为基础，其电压方程为

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L_d p & -L_q\Omega & 0 \\ L_d\Omega & R + L_q p & 0 \\ 0 & 0 & R + L_0 p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Omega\Psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.6-9}$$

式中，R 为电枢绕组电阻，Ω；L_d、L_q、L_0 分别为 d 轴同步电感，H，q 轴同步电感，H，0 轴同步电感，H；p 表示 $\mathrm{d}/\mathrm{d}t$；Ψ_f 为永磁磁场与电枢绕组相交链的磁链。

端电压（V）、感应电动势（V）、电枢绕组电流（A）的坐标变换方程如下

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \vdots \end{bmatrix} = \boldsymbol{C} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \tag{5.6-10}$$

两相、三相、四相系统的变换矩阵分别为 $\boldsymbol{C}_2$、$\boldsymbol{C}_3$、$\boldsymbol{C}_4$，如下所示

$$\boldsymbol{C}_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}_3 = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta-\alpha) & \sin(\theta-\alpha) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta-2\alpha) & \sin(\theta-2\alpha) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{5.6-11}$$

$$\boldsymbol{C}_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ \sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ -\cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \end{bmatrix}$$

式中，$\alpha = \frac{2\pi}{3}$。

磁链方程为

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases} \tag{5.6-12}$$

电磁转矩为

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{1}{2} p(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \\ &= \frac{1}{2} p[\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \end{aligned} \tag{5.6-13}$$

式中，p 为电动机磁极对数；θ 为定子 A 相绕组轴线与坐标 d 轴间的夹角；运动方程同式（5.6-8）。

3　电枢绕组及其与逆变器的连接

3.1　电枢绕组

永磁无刷电动机的电枢绕组与交流电动机的电枢绕组相同，有单层绕组、双层绕组和单双层混合绕组等，如图 5.6-10 所示。

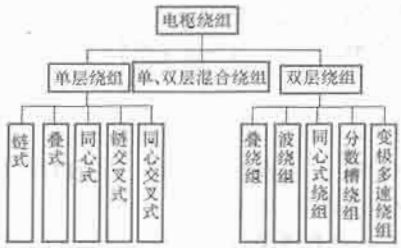


图 5.6-10　电枢绕组的种类和型式

3.1.1　单层绕组

单层绕组是一个槽中的全部导体与另一个槽中的全部导体串联成一个线圈。与双层绕组相比较，单层绕组的特点有：

1）线圈数量少一半。

2）槽内无需层间绝缘，槽利用率高。

3）线圈节距只能是整距。

4）多应用于小容量电机。

单层绕组按线圈端部的排列不同，分为链式绕组、同心式绕组、叠式绕组和交叉式绕组。

3.1.2　双层绕组

双层绕组是每槽导体分为上、下两层，每个线圈的一条直线边嵌放于槽的上层，另一边嵌放于另一槽的下层。与单层绕组比较，双层绕组的特点有：

1）线圈数量多一倍。

2）需要层间绝缘，槽利用率有所降低，且存在相间击穿的可能。

3）线圈节距可调，可采取适当的短距削弱电动势谐波，改善电磁性能。

4）多应用于 10kW 以上的电动机中。

单速电动机双层绕组一般都采用全极式布线方式，倍极双速电动机高速时为全极式双层绕组，低速时为半极双层绕组。双层绕组按线圈型式不同可分为叠绕组、同心绕组和波绕组。双层波绕组因展开图形似波浪而得名。与叠绕组相比，波绕组的特点有：

1）每相绕组先将不同极下线圈串联绕行一周，回到第一个线圈的左边，再继续绕行第二周，直到连接完该相的全部线圈。

2）一般用于低压大电流电机的单匝成型绕组。

3）极间连线较少。

3.1.3　单、双层混合绕组

单、双层混合绕组由双层短距叠绕组演变而来。将双层短距绕组中，同槽内属于同一相的上、下层线圈有效边合并成一只单层大线圈，而同槽不同相的上、下层线圈保持不变，而端部结构改变，形成单、双层混合绕组。

3.1.4　分数槽电枢绕组

每极每相槽数 q 是分数的绕组称为分数槽绕组。分数槽绕组技术在永磁无刷电动机应用逐渐增多。采用分数槽绕组的主要优点在于：

1）电枢冲片的齿槽数减少，便于电枢冲片的制作，有利于槽利用率的提高。

2）有可能得到节距 $y=1$ 的设计，即每个齿上绕制一个集中线圈，便于采用自动绕线机绕制，提高效率。同时不同相线圈端部没有重叠，不必设相间绝缘。

3）能显著地缩短电枢线圈的端部长度，电动机绕组电阻减小，铜损耗随之降低，提高电动机的性能。

4）减小齿槽效应引起的转矩波动。

采用分数槽绕组时，每极每相槽数为

$$q=\frac{Z}{2pm}=b+\frac{c}{d} \tag{5.6-14}$$

式中，m 为相数；Z 为齿数（槽数）；p 为磁极对数；b 为整数；c/d 为不可约的真分数。

一般而言，分数槽绕组的 Z 和 p 有最大公约数 t，即

$$\frac{Z}{p}=\frac{Z_0}{p_0} \tag{5.6-15}$$

式中，$Z=Z_0t$，$p=p_0t$，则

$$q=\frac{Z_0}{2mp_0} \tag{5.6-16}$$

由 Z_0 和 p_0 组成的电动机称为单元电动机，原电机由 t 个单元电动机组成。

式（5.6-16）意味着：电动机采用分数槽绕组时，每 $2p_0$ 个磁极下每相占有 Z_0/m 个齿。电动机的齿槽分布、感应电动势相量图和磁动势相量图以 $2p_0$ 个磁极为一个周期，重复 t 次。在同一个 $2p_0$ 个磁极范围内，若把各对磁极依次重叠起来，即把 p_0 个相平面重叠起来，则不同磁极对下面的齿槽就不会一一对应重合。各个磁极对下面的绕组导体中的感应电动势相量，或由该绕组导体内的电流所产生的磁动势相量也不是同相位的。因此，在 $2p_0$ 个磁极范围内，每相总的感应电动势不是每对磁极下每相感应电动势的标量代数相加，而是相量几何相加。由此可见，相对短距绕组实现了层与层之间的分布和分布绕组实现了槽与槽之间的分布而言，分数槽绕组则进而实现了磁极对与磁极对之间的分布。

在电动机中，为了获得对称的电动势和磁动势，首先要求有对称的电枢绕组。对三相电动机而言，所谓对称的电动势和磁动势，即要求三相的电动势和磁动势在数值上相等，相互间相位相差 120°电角度。不是任何槽数 Z 和任何磁极对数 p 相配合就能获得对称的电枢绕组。为了获得对称的电枢绕组，参数 Z、p 和 m 必须满足下列关系：

1）$Z_0/m=$ 整数。对于三相电动机，$m=3$，Z_0 必须为 3 的倍数。

2）$p_0/m\neq$ 整数。对于三相电动机，$m=3$，p_0 不允许是 3 的整数倍。

3.2 三相半控、全控电路

永磁无刷电动机经常采用三相对称绕组。三相绕组既可以是星形（Y）联结，也可以是三角形（△）联结，功率逆变器有全控（桥式）和半控（非桥式）两种。

3.2.1 三相半控电路

常见的三相半控电路如图 5.6-11(a)所示。图中，A、B、C 三相绕组分别与 3 只功率开关管 VT1、VT2、VT3 串联，来自位置传感器的信号 H_1、H_2、H_3[见图 5.6-11(b)]控制 3 只功率开关管的通断。

在电流值恒定的情况下，三相半控 120°导通的转矩波形如图 5.6-12 所示。

三相半控电路结构简单，但电动机绕组的利用率很低，运行过程中转矩波动较大。

3.2.2 三相星形联结全控电路

三相星形联结全控式主电路如图 5.6-8 所示。图中上桥臂三个开关管 VT1、VT3、VT5 是 P 沟道 MOSFET，栅极电位低电平时导通；下桥臂三个开关管 VT2、VT4、VT6

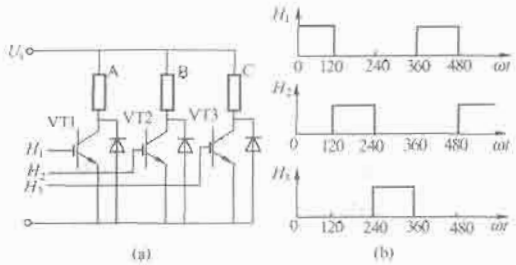


图 5.6-11 三相星形联结半控主电路及位置传感器信号

（a）三相半控主电路；（b）三相半控主电路中位置传感器信号

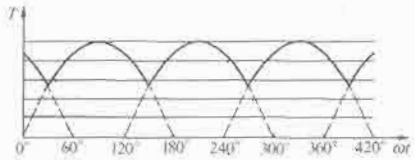


图 5.6-12 三相半控主电路恒电流下的转矩波形

是 N 沟道 MOSFET，栅极电位高电平时导通。这种逆变器电路利用 P 沟道 MOSFET 和 N 沟道 MOSFET 导通规律的互补性，简化了功率开关管的驱动电路。位置传感器的 3 个输出信号通过逻辑电路控制这些开关管的导通和截止，其控制方式有两种：二二导通方式和三三导通方式。

（1）二二导通方式

如图 5.6-13 给出了永磁无刷电动机三相绕组的反电动势波形及其二二导通方式下的开关管导通规律。为了使电动机获得最大转矩，在二二导通方式下，开关管的导通顺序为 VT1、VT2—VT2、VT3…VT3、VT4—VT4、VT5—VT5、VT6—VT6、VT1。在这种工作方式下，每个电周期共有 6 个导通状态，每隔 60°电角度，工作状态改变一次，每个开关管导通 120°电角度。

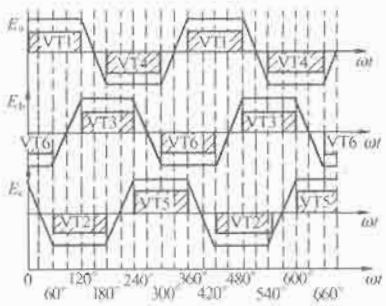


图 5.6-13 三相绕组的反电动势波形及其二二导通方式下的导通规律

如果假定电流为矩形波，电动机工作在两相导通星形三相六状态方式时，总的电磁转矩是每相电磁转矩的两倍。如果气隙磁通密度在空间呈正弦分布，容易得出此时合成转矩是每相电磁转矩的 $\sqrt{3}$ 倍（见图 5.6-14）。

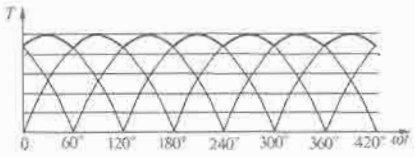


图 5.6-14 气隙磁通密度在空间呈正弦波时的转矩波形

(2) 三三导通方式

三三导通方式是在任一瞬间使 3 个开关管同时导通，如图 5.6-15 所示。各开关管的导通顺序为 VT1、VT2、VT3—VT2、VT3、VT4—VT3、VT4、VT5—VT4、VT5、VT6—VT5、VT6、VT1—VT6、VT1、VT2。在这种工作方式下，每个电周期共有 6 个导通状态，每隔 60°电角度工作状态改变一次，每个开关管导通 180°电角度。

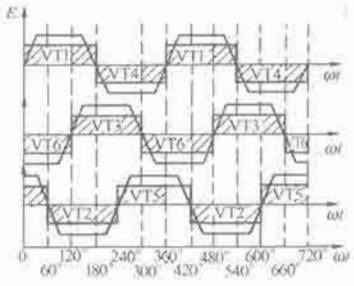


图 5.6-15　三相绕组的反电动势波形及其三三导通方式下的导通规律

当 VT1、VT2、VT3 导通时，电流的路线为

VT1→A 相
VT3→B 相　→C 相→VT2→

其中，A 相和 B 相相当于并联。如果假定 C 相绕组的电流为 I，则 A、B 两相绕组的电流分别为 $I/2$，可以求得电枢绕组产生的总电磁转矩约为单相转矩的两倍。

在三三导通方式下，各相绕组不是在反电动势波的平顶部分换向，而是在反电动势的过零点换相。因此，在电枢电流相同的情况下，三三导通方式下平均电磁转矩比二二导通方式下要小。如果假设气隙磁通密度在空间呈正弦分布，则合成电磁转矩是单相电磁转矩的 1.5 倍。

3.2.3　三相△联结全控电路

图 5.6-16 是三相△联结全控电路。与星形联结一样，△联结全控电路也有二二导通和三三导通两种。

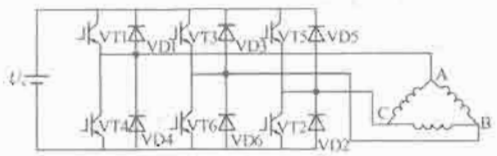


图 5.6-16　三相△联结三相全控式主电路

(1) 二二导通方式

三相△联结导通方式下的开关管的导通顺序为 VT1、VT2—VT2、VT3—VT3、VT4—VT4、VT5—VT5、VT6—VT6、VT1，如图 5.6-17 所示。

当 VT1、VT2 导通时，电流的路线为

VT1→A 相→B 相
　　→C 相　→VT2→

如果假定 C 相绕组的电流为 I，则 A、B 两相绕组的电流分别为 $I/2$，总电磁转矩约为单相转矩的两倍。如果假定气隙磁通密度在空间呈正弦分布，则合成电磁转矩是单相电磁转矩的 1.5 倍。

可见，△联结二二导通方式下永磁无刷电动机的工作状况和星形联结三三导通时情况相似。

(2) 三三导通方式

△联结三三导通方式下各开关管的导通顺序为 VT1、VT2、VT3—VT2、VT3、VT4—VT3、VT4、VT5—VT4、VT5、VT6—VT5、VT6、VT1—VT6、VT1、VT2，如图 5.6-18 所示。

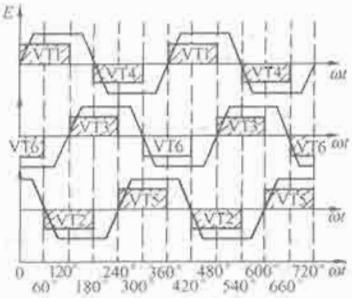


图 5.6-17　电枢绕组的反电动势波形及其△联结二二导通方式下的导通规律

当 VT1、VT2、VT3 导通时，电流的路线为

VT1→C 相
VT3→B 相　→A 相→VT2

其中，C 相和 B 相绕组相当于并联。如果假定 C 相绕组的电流为 I，可以求得电枢绕组产生的总电磁转矩约为单相转矩的两倍。如果气隙磁通密度在空间呈正弦分布，容易得出此时合成转矩是每相电磁转矩的 $\sqrt{3}$ 倍。

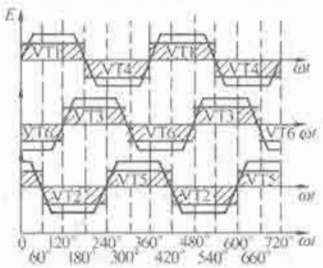


图 5.6-18　电枢绕组的反电动势波形及其△联结三三导通方式下的导通规律

△联结三三导通方式下永磁无刷电动机的工作情况与星形联结二二导通时情况相似。不同的是，在星形联结二二通电方式下，两通电绕组为串联；而△联结三三导通方式下通电时，两绕组为并联。

3.3　多相无刷电动机

无刷电动机应用最广泛的是三相电动机，常见的还有两相、四相、五相等（见图 5.6-19～图 5.6-21）多种，其换相基本方法与三相永磁无刷电动机相同。

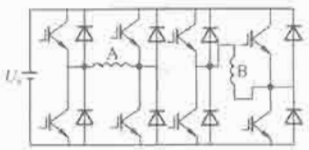


图 5.6-19　正交两相全控主电路

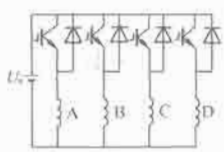


图 5.6-20　四相半控主电路

现以五相电动机为例说明。图 5.6-22(a)和图 5.6-22(b)分别表示了五相无刷电动机的电路原理图和五相绕组分别通电时所产生的转矩矢量图。和三相半控电路一样，用 5 只功率管分别接通五相绕组，并用 5 只霍尔元件作为位置传感器，每只霍尔元件输出高电平的脉宽为 72°电角度，其余 228°低电平。每隔 72°电角度换相一次，其转矩矢量就转过

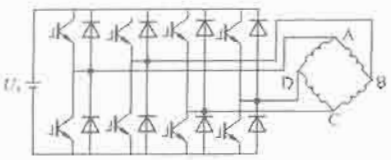


图 5.6-21 封闭形联结四相桥式主电路

72°电角度，每次接通一个绕组。这样的控制虽然很简单，但电动机绕组的利用率很低，常用的还有二三通电方式、五五通电方式及五四通电方式等。

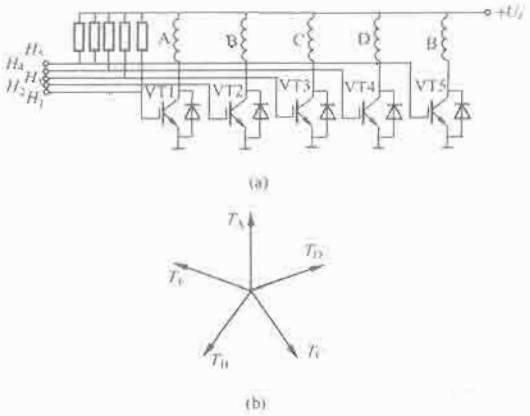


图 5.6-22 五相半波控制原理图

3.3.1 二三通电方式

通电顺序为 VT1、VT2—VT1、VT2、VT3—VT2、VT3—VT2、VT3、VT4—VT3、VT4—VT3、VT4、VT5、…。当 VT1、VT2 通电时，其合成转矩矢量如图 5.6-23所示。其方向为 A、B 两相转矩矢量夹角的角平分线上。假设在一定的电流作用下，各相产生的转矩为 T_0，则此时的合成转矩大小为 $2T_0\cos36^\circ=1.618T_0$。

当 VT1、VT2、VT3 通电时，合成转矩矢量如图 5.6-24所示，其方向同 B 相。由于各相绕组所产生的转矩均相等，所以合成转矩的大小为 $T_0+2T_0\cos72^\circ=1.618T_0$。这样每个绕组通电 1/2 周期，每次换相的是一个绕组，但分两个节拍进行。如原来为 VT1、VT2 导通，换相时先使 VT3 导通，变成 VT1、VT2、VT3 同时导通状态，过一个节拍后，再断开 VT1，变成 VT2、VT3 导通状态。以上 3 个状态的合成转矩大小是一样的，均为 $1.618T_0$，但相位分别相差 36°电角度。

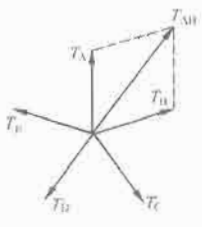


图 5.6-23 A、B 两相合成转矩

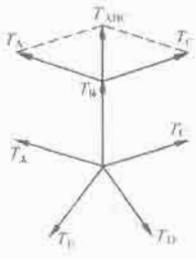


图 5.6-24 A、B、C 三相合成转矩

3.3.2 五五通电方式

五五通电方式为每个瞬间五个绕组均通电，但通电方式有三正两负或两正三负两种情况。

当 A、B、E 三相绕组正向通电，C、D 两相绕组负向通电时，其合成转矩方向同 A 相转矩，如图 5.6-25 所示，其大小为：$T_{05}=T_0+2T_0\cos72^\circ+2T_0\cos36^\circ=3.236T_0$。

经过 36°电角度后换相一次，把绕组 E 中的电流由正向变成反向通电，变成 A、B 正向通电、C、D、E 负向通电，这时合成矢量如图 5.6-26 所示，其方向同 D 相，大小仍为 $3.236T_0$，合成矢量转过 36°电角度。如此每隔 36°电角度换相一次，一个周期（360°电角度）换相 10 次。在整个运行过程中，5 个绕组均通电，只不过通电的正负不同，大大提高了永磁无刷电动机定子绕组的利用率。在电动机转子转过 360°电角度过程中，每相绕组正反相通电各 180°电角度，波形很对称，给控制电路带来方便。

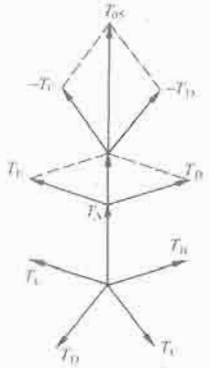


图 5.6-25 五相通电时的合成转矩矢量（1）

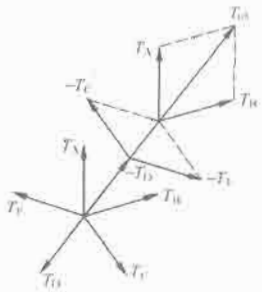


图 5.6-26 五相通电时的合成转矩矢量（2）

由于每隔 36°电角度就换相一次，故其合成转矩波动很小，但其换相主电路要复杂许多。

3.3.3 五四通电方式

在五五通电的换相过程中插入了一个不通电状态，就变成了五四通电方式。其换相顺序为 VT1、VT2、VT3、VT4、VT5—VT2、VT3、VT4、VT5—VT2、VT3、VT4、VT5、VT6—VT3、VT4、VT5、VT6—、…。这种线路的突出优点是简单，每次换相其合成转矩矢量仅转过 18°电角度。换相顺序控制的缺点是在每一瞬间通过各绕组的电流不等。一个周期换相 20 次。

4 转子位置传感器

永磁无刷电动机系统中常用的位置传感器不但要完成电动机转子磁极位置的检测，同时要实现速度测量与转子转角检测。但目前并不是所有的位置传感器都能同时完成这些功能的，有的检测元件只能完成其中的一、两种。各种位置传感器都有自身的固有特点，要针对具体控制对象要求，选择合适的位置传感器。目前，系统常用的位置传感器有光电式、电磁式等。

4.1 光电编码器

光电编码器的特点是数据处理电路简单。因为是数字信号，所以噪声容限较大，容易实现高分辨率，检测精度高。其缺点是不耐冲击及振动，容易受温度变化影响，适应环境能力较差。光电编码器广泛用于各类伺服电动机的速度和位置检测。按脉冲与对应位置（角度）的关系，光电编码器通常分为增量式光电编码器、绝对式光电编码器以及将上述两者结合为一体的混合式光电编码器。

4.1.1 增量式光电编码器

增量式光电编码器的特点是每产生一个输出脉冲信号就对应一个增量位移角，但不能通过输出脉冲区别出是哪一个增量位移角，即无法区别是在哪个位置上的增量。编码器能产生与轴角位移增量等效的电脉冲。这种编码器的作用是提

供一种对连续轴角位移量离散化或增量化以及角位移变化（角速度）的传感方法，它不能直接检测出轴的绝对角度。

光电编码器的分辨能力是以编码器轴转动一周所产生的输出信号基本周期数，用脉冲数/转表示，并以此定义为编码器的分辨率。

增量式编码器的精度是一种度量在所选定的分辨范围内，准确确定任一脉冲相对另一脉冲位置的能力，通常用角度、角分或角秒来表示。编码器的精度与转盘缝隙的加工质量、转盘的机械旋转情况等制造因素有关，也与安装技术有关。

编码器输出的稳定性是指在实际运行条件下，保持规定精度的能力。影响编码器输出性能稳定性的主要因素是温度对电子器件造成的漂移，外界加于编码器的变形力以及光源特性的变化。由于受到温度和电源变化的影响，编码器的电子电路不能保持规定的输出特性。在设计和使用中都要充分考虑到这一点。

编码器输出的响应频率取决于光敏元件和电子处理线路的响应速度。当编码器高速度旋转时，如果分辨率很高，输出的信号频率将会很高。如果光敏元件和电子元件的工作速度不能与之相适应，就有可能使输出波形严重畸变，甚至会产生丢失脉冲的现象。所以，每一种编码器在其分辨率确定的条件下，最高转速也是一定的，也就是说它的响应频率是受限的。

在大多数情况下，直接从编码器光敏元件获取的信号电平较低，波形也不规则，还不能适应于信息控制、处理和远距离传输的要求。所以，在编码器内还必须将此信号放大与整形。经过处理的输出信号一般为近似正弦波或矩形波。由于矩形波输出信号容易进行数字处理，所以这种输出信号在定位控制中应用十分广泛。但是，当输出信号为近似正弦波时，也有其独特的优点：

1）在定位停止时，没有振荡现象。

2）把输出的近似正弦波和余弦波信号微分合成，可以得到模拟速度信号。

3）可以进行电子内插，以较低的成本得到较高的分辨率。

近似正弦波输出信号的合成如图 5.6-27 所示。矩形波输出信号如图 5.6-28 所示。

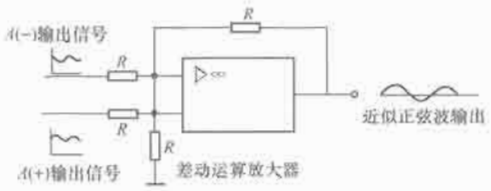


图 5.6-27　近似正弦波输出信号的构成

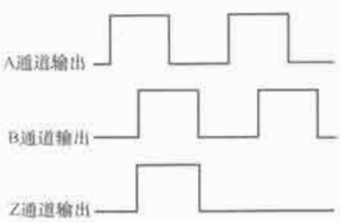


图 5.6-28　矩形波输出信号

在许多实际应用中，要求伺服电动机在正反两个方向上能实现可逆运行，这就要求编码器输出两路正交信号，如图 5.6-28 所示。

对应编码器的某一旋转方向，两个信号明确而单值地表示了从“0”到“1”和从“1”到“0”的跃变逻辑。所以，对这两个跃变逻辑信号与某相静态逻辑信号进行编码，可以设计出正反方向鉴别电路，如图 5.6-29 所示。方向判别电路的输出波形如图 5.6-30 所示。

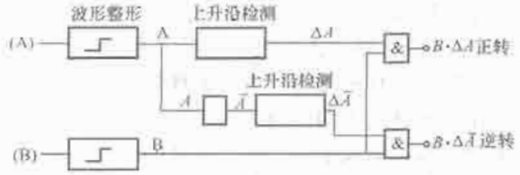


图 5.6-29　旋转方向判别电路框图

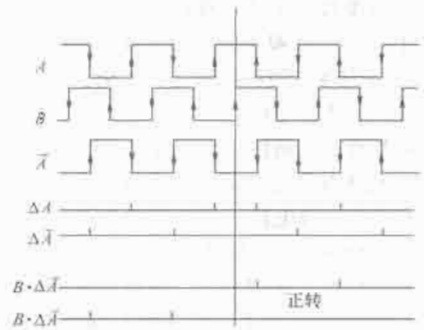


图 5.6-30　方向判别电路的输出波形

4.1.2　绝对式光电编码器

绝对式光电编码器的零点固定，输出为矩形波的自然二进制码。输出是轴角位置的单值函数，即输出的二进制数与轴角位置具有一一对应的关系。

通常，在停电时数据丢失或在运行时虽然通电但无数据读出的机械运动情况下，就需要采用绝对式光电编码器。

绝对式光电编码器多为单转式，它所能测量轴角的范围是 0°～360°，因而不适应多转速运动控制中检测绝对位置的要求。传统的绝对式光电编码器的另一个缺点是，在把位置绝对值信号进行采样处理时，由于延迟时间的存在，不适应于高速控制的需要。

多转绝对式光电编码器可以看成是由一个单转绝对式光电编码器和一个增量式磁性编码器组成。其中单转绝对式光电编码器的任务是在 1r 之内实现高分辨率、高精度的绝对位置检测。而增量式磁性编码器是用来检测转轴的旋转次数，转轴每旋转 1 周，磁增量编码器就发生一个脉冲，并送入计数器进行计数。

多转绝对式光电编码器能够进行转轴旋转次数的检测与信息记忆，以及 1r 内对绝对角度的检测、信号修正、数据处理、信号传输，具有很强的灵活性。与传统的单转绝对式光电编码器相比，结构虽然是复杂了，但功能却大为增强，用途更为广泛。采用专用的微机和大规模集成电路作为信号处理，使这种编码器易于实现小型化。

4.1.3　混合式光电编码器

混合式光电编码器就是在增量式光电编码器的基础上，加装了一个用于检测电动机磁极位置的编码器而组成的一种光电编码器。其中，用于检测磁极位置的是一种绝对式编码器，它的输出信号在一定精度上与磁极位置具有对应的关系。

4.2　磁编码器

随着磁性材料和磁阻元件的发展，已开发出各种类型的磁性编码器，有电磁解调型、霍尔元件型、半导体磁阻效应型、强磁体磁阻效应型等。磁性编码器在数控机床主轴拖动中已经得到了应用，取得了与光电编码器相同的性能，并且

在电气接线上具有良好的互换性。磁性编码器与光电编码器相比较，突出的优点是：适应环境能力强、耐高温、耐油污、功耗低、传感器结构简单、成本低、坚固耐用、响应速度快，非常适用于高速旋转运动场合使用。缺点是制成高分辨率有一定的困难。

4.2.1 霍尔集成电路（霍尔效应位置传感器）

霍尔元件是一种利用霍尔效应原理制成的半导体器件。

分立霍尔元件输出的电动势信号较低，使用时需要较多的外围电路。霍尔集成电路是将有关外围电路和霍尔元件集成在一起，组成一个有源的磁敏集成电路。通常将霍尔元件、放大器、温度补偿电路、输出级、电源稳压电路等制作在同一硅片上，然后用陶瓷或塑料封装。按输出的不同，霍尔集成电路可分为线性型和开关型两大类。

（1）线性霍尔集成电路

线性霍尔集成电路的输出电压与外磁场强度呈线性关系。线性霍尔集成电路内部包括霍尔发生器、差分线性放大、射极跟随输出及稳压电源电路。其原理图如图 5.6-31 所示，在一定磁感应强度范围内，其输出电压与外磁感应强度呈线性关系，输出特性如图 5.6-32 所示。不同型号的静态输出电压（在零磁感应强度时的输出电压）、输出斜率等有所不同。

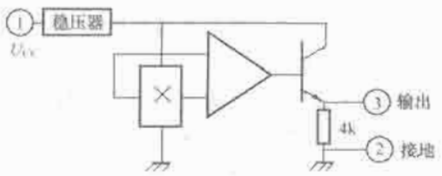


图 5.6-31 线性霍尔集成电路原理图

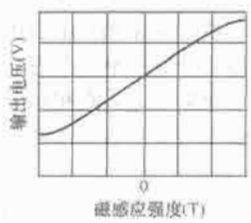


图 5.6-32 线性霍尔集成电路输出特性

（2）开关型霍尔集成电路

开关型霍尔集成电路是将电压稳压器、霍尔电压发生器、温度补偿电路、信号发生器和集电极开路输出极制作在一个硅片上（见图 5.6-33），当外加磁感应强度从负值向正值方向增加到某一 B_{OP} 值（称为动作值），输出由高电平翻转为低电平。如果磁感应强度由正值向负值方向降低，在小于 B_{OP} 一定数值的某一 B_{RP} 值（称为返回值）时，输出由低电平翻转回高电平。B_{OP} 和 B_{RP} 之差称为回差，如图 5.6-34 和图 5.6-35 所示。

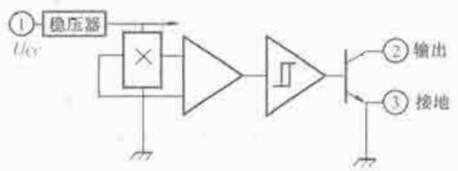


图 5.6-33 开关型霍尔集成电路原理图

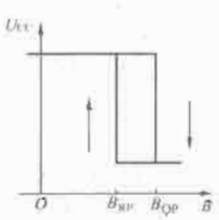


图 5.6-34 开关型（单、双极型）霍尔集成电路输出特性

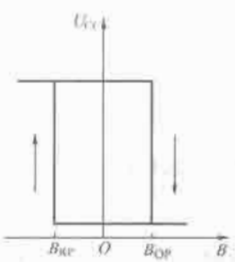


图 5.6-35 开关型（锁存型）霍尔集成电路输出特性

开关型霍尔集成电路的输出只有两个状态，即高逻辑电平或低逻辑电平，当外磁场强度变化时，输出逻辑状态会翻转。它分为单极性、双极性和锁存型霍尔开关。单极性开关的动作值 B_{OP} 和返回值 B_{RP} 均为正，仅对 S 极磁场变化产生开关动作，对 N 极磁场没有反应，适用于单极性磁场的检测。双极性开关的动作值 B_{OP} 和返回值 B_{RP} 都可能在 S 极和 N 极下，适用于检测有 S 极和 N 极交替变化的磁场情况。锁存型霍尔开关的动作值在 S 极，返回值在 N 极下，在 S 极某一磁感应强度（$\geqslant B_{OP}$）下，其输出是导通状态（ON），当 S 极逐渐离开 IC，磁感应强度为零时，其输出仍然保持为 ON 状态，故名为“锁存型”。只有磁场转变为 N 极，并达到 B_{RP} 值时，输出才翻转为截止状态（OFF）。

霍尔集成电路在使用中必须有外加磁场，并且对磁场的磁通密度最低值和形状都有一定的限制。还有一种霍尔集成电路，是将永磁体一并封装在一起，霍尔元件和永磁体之间留有一个间隙。当间隙中有软磁材料时，磁场被短路，这时就没有霍尔电动势输出，当软磁材料移开时，有霍尔电动势输出。可以根据一定的需要，用软磁材料做成一定尺寸形状的零件，在霍尔电路的间隙中移动，以给出所需要的霍尔电动势波形。

4.2.2 强磁阻效应型编码器

强磁阻效应型编码器主要由磁鼓、磁传感器及相应的电子线路组成。磁鼓外周为磁记录媒体。该媒体可以是磁性涂料或塑胶磁体。媒体被磁化成许多 N～S 极，磁传感器是在玻璃板上蒸镀许多强磁体磁阻效应元件（MR）所构成。若外加磁场发生变化，MR 元件的电阻也随之发生变化，于是在桥式电路的输出端便得到近似正弦波的电压信号。

4.3 旋转变压器

旋转变压器的特点是结构坚固，耐用，抗振动冲击能力强，可在高温下工作，具有很强的环境适应能力，可通过控制电路较容易改变分辨率。缺点是信号处理电路复杂，可以作为磁极位置、电动机速度和系统位置检测用，详见本篇第 15 章。

4.4 传感技术——无位置传感器控制方法

位置传感器虽然为转子位置提供了最直接有效的检测方法，但是它也使电动机增加了体积，需要多条信号线，更增加了电动机制造的工艺要求和成本。因此，近年来推出了几种永磁无刷电动机的无位置传感器控制方法，如反电动势检测法、续流二极管工作状态检测法、瞬时电压方程法等。利用反电动势检测转子位置是目前最常见和应用最广泛的一种方法。

对于最常见的两相导通星形三相六状态工作方式，除了换相的瞬间之外，在任意时刻，电动机总有一相绕组处于断电状态。当断电相绕组的反电动势过零点之后，再经过 30°电角度，就是该相的换相点。因此，只要检测到各相绕组反电动势的过零点，就可确定电动机的转子位置和下次换流的时间。

反电动势法的缺陷是当电动机在静止或低速运行时，反电动势为 0 或太小，因而无法利用，一般采用专门的起动电路，使电动机以他控变频方式起动，当电动机具有一定的初速度和电动势后，再切换到自控变频状态。这个过程称为三段式起动，包括转子定位、加速和运行状态切换三个阶段。

5 基本特性

5.1 工作区

永磁无刷电动机的工作区如图 5.6-36 所示。借助 4 个

基本参数来确定永磁无刷电动机的工作区范围。

1）最高允许工作转速。在保证电气绝缘介电强度和机械强度条件下，电动机最大设计转速。

2）最大连续转矩（额定转矩）。在规定条件下，电动机所能输出的最大转矩，在该转矩下连续运行，电动机绕组温度和驱动器功率器件温度不会超过最高允许温度，电动机或驱动器不会损坏。

3）额定转速。电动机输出最大连续转矩，以额定功率运行时的转速。

4）峰值转矩。在规定条件下，电动机所能输出的最大转矩。在峰值转矩下短时工作不会引起电机损坏或性能不可恢复。

上述 4 个参数将永磁无刷电动机工作区分为两个区域：连续工作区和短时工作区。

图 5.6-36 中处于“最大连续转矩”、“最高允许工作转速”和“额定转速”以内的工作区域（图中无阴影区域），它是由电动机的发热、受离心力影响的机械强度、换相或驱动器的极限工作条件限制的范围。在此区域内运行，电动机和驱动器都不会超过其最高允许温度。

在 n_N～n_{max}之间恒功率运行，n_N所对应点为额定功率。额定功率 P_N（W）、额定转速 n_N（r/min）与最大连续转矩 T_N（N·m）的关系为 $P_N=\dfrac{T_N n_N}{60/2\pi}$。

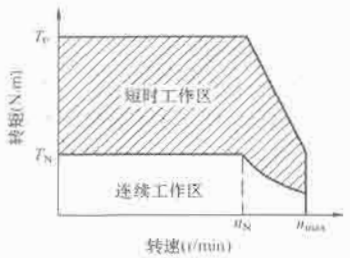


图 5.6-36　工作区示意图

T_p—峰值转矩；n_{max}—最高允许工作转速；n_N—额定转速；T_N—最大连续转矩

图 5.6-36 中，处于峰值转矩以下，最大连续转矩以上的区域（图中阴影区域）为短时工作区。在该区域短时工作，电动机电流虽大于最大连续电流，但电动机绕组在一定时间内不会被损坏。

短时过流持续时间是由绕组的热时间常数决定的。

5.2　基本参数

5.2.1　反电动势常数和转矩常数

反电动势常数和转矩常数是电动机最基本的参数，与电动机的绕组和具体结构有关，二者有一定的内在联系。反电动势常数 K_e是电动机单位转速时在电枢绕组中产生的感应电动势。转矩常数 K_t是电动机电枢中通入单位电流时所产生的电磁转矩。

对于方波驱动，当反电动势常数量纲为 V（rad/s），转矩常数量纲为 N·m/A 时，永磁无刷电动机的反电动势常数等于转矩常数。

正弦波驱动时有

$$K_t=\sqrt{3}K_e \tag{5.6-17}$$

对同一台电动机，采用不同的绕组联结方式时有

$$K_{ty}=\sqrt{3}K_{t\Delta},K_{ey}=\sqrt{3}K_{e\Delta} \tag{5.6-18}$$

5.2.2　电感

根据永磁无刷电动机转子结构不同，电枢电感也不同。对表面式磁极结构，其磁阻与转子位置无关，电枢绕组的 d 轴电感 L_d和 q 轴电感 L_q相等，属于隐极特性。对于内置式磁极结构，由于 d 轴方向和 q 轴方向磁阻不同，存在 $L_d\neq L_q$，电动机呈凸极特性。

由于凸极效应的存在，定子绕组的磁链不仅与三相绕组有关，而且和转子永磁磁场及转子相对定子绕组的位置有关。其磁链方程的一般形式为

$$\begin{cases}\Psi_a=L_a i_a+M_{ab}i_b+M_{ac}i_c+\Psi_f\cos\theta\\ \Psi_b=M_{ba}i_a+L_b i_b+M_{bc}i_c+\Psi_f\cos\left(\theta-\dfrac{2}{3}\pi\right)\\ \Psi_c=M_{ca}i_a+M_{cb}i_b+L_c i_c+\Psi_f\cos\left(\theta+\dfrac{2}{3}\pi\right)\end{cases} \tag{5.6-19}$$

式中，θ为定子 a 相绕组轴线与坐标 d 轴之间的夹角；Ψ_f为永磁磁场与定子电枢绕组匝链的磁链。

无论是自感还是互感，都由定子漏磁路相关的漏电感和与气隙及定、转子主磁路相关的主电感组成。对定子某一相绕组来说，当转子直轴与该相绕组轴重合时，该相绕组面对的是直轴气隙；而当交轴与该相绕组的轴线一致时，面对的是交轴气隙。气隙磁导分布按照转子位置角的偶次谐波变化。忽略高次谐波，对自感和互感可得

$$\begin{cases}L_a=L_\sigma+L_0+L_2\cos 2\theta\\ L_b=L_\sigma+L_0+L_2\cos 2\left(\theta-\dfrac{2}{3}\pi\right)\\ L_c=L_\sigma+L_0+L_2\cos 2\left(\theta+\dfrac{2}{3}\pi\right)\end{cases} \tag{5.6-20}$$

$$\begin{cases}M_{ab}=M_{ba}=M_\sigma-\dfrac{1}{2}L_0+L_2\cos\left(2\theta-\dfrac{2}{3}\pi\right)\\ M_{bc}=M_{cb}=M_\sigma-\dfrac{1}{2}L_0+L_2\cos(2\theta)\\ M_{ca}=M_{ac}=M_\sigma-\dfrac{1}{2}L_0+L_2\cos\left(2\theta+\dfrac{2}{3}\pi\right)\end{cases} \tag{5.6-21}$$

式中，L_σ为漏自感，H；M_σ为漏互感，H；L_a、L_b、L_c为 a、b、c 相自感，H；M_{ab}、M_{bc}、M_{ca}、M_{ba}、M_{cb}、M_{ac}为互感，H；L_0为平均电感，H；L_2为二次谐波电感幅值，H。

采用 dq0 坐标系统，进行两次变换后，可得 dq0 坐标系下的电感参数为

$$\begin{cases}L_d=L_\sigma-M_\sigma+\dfrac{3}{2}(L_0+L_2)\\ L_q=L_\sigma-M_\sigma+\dfrac{3}{2}(L_0-L_2)\end{cases} \tag{5.6-22}$$

由上式可知在 dq0 坐标系下，电感参数与转子位置无关。当采用表贴式转子结构时，$L_2=0$，此时 $L_d=L_q$。

5.2.3　电气时间常数 τ_e、机械时间常数 τ_m和机电时间常数 τ_{me}

对方波驱动的永磁无刷电动机，其电动机的转矩常数 K_t和反电动势常数 K_e完全相等。

电气时间常数　$\tau_e=\dfrac{L}{R}$

机械时间常数　$\tau_m=\dfrac{RJ}{K_eK_t}$

机电时间常数 τ_{me}则定义为电动机空载加阶跃额定电压起动时，当转速达到稳定空载转速的 63.2%时所需的时间。

对正弦波驱动的永磁无刷电动机，进行磁场定向控制，使直轴电流 $i_d=0$，这时单位电流产生的转矩最大，一般是

最主要的运行方式之一。这时有：

电气时间常数 $\tau_e = \dfrac{L_m}{R}$

机械时间常数 $\tau_m = \dfrac{RJ}{\sqrt{3}K_eK_t}$

5.3 转矩波动

转矩波动是永磁无刷电动机运行时的一个十分重要的性能指标。在输入电流恒定时，电动机旋转1周，其电磁转矩或转轴的输出转矩以平均值为基准出现上下波动的现象称为转矩波动，如图5.6-37所示。通常，转矩波动是用其上下波动值对其平均值之比的百分数来表示的。

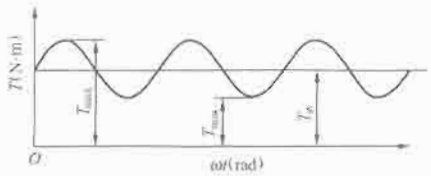


图5.6-37 转矩波动示意图

转矩波动的定义为

$$\Delta T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} + T_{min}} \times 100\% \qquad (5.6\text{-}23)$$

式中，ΔT为转矩波动；T_{max}为最大电磁转矩；T_{min}为最小电磁转矩。

导致转矩波动的因素较多，原因复杂，既和电动机设计、具体结构及加工有关，也与运行方式有关。

5.3.1 齿槽转矩引起的转矩波动

由于电动机铁心开槽，当转子转动时，磁路中的磁阻将发生变化，导致磁场能量发生变化，因而产生磁阻转矩，使电动机的转矩随齿槽而发生变化。其特点为：

1）周期性的，与转子位置有关，波动频率与齿槽相关。

2）波动幅值大小与齿槽形状、磁路的饱和程度有关。

3）无论电动机是带载运行、空载运行，还是通电不运行时都存在，但其幅值大小在不同状况下有区别。

4）尽管具有磁阻转矩的性质，但电动机中如没有建立磁场，且没有磁场能量的变化，将不会反映出转矩。

齿槽转矩产生的转矩波动，主要危害表现在：低速时主要使电动机产生振动；高速时主要产生噪声；并使电动机的可控性变差。

减小齿槽转矩可采取以下几种的方法：

1）直接法。从齿槽转矩产生的根源入手，直接削弱齿槽的影响。如尽可能减小槽口宽度；安装磁性槽楔；合理设计磁路，增大气隙，减小气隙磁通密度；改善气隙磁场分布等。

2）抵消法。抵消法是通过设计手段，使产生的齿槽转矩波动相互抵消，如斜槽、斜极等，一般采用定子斜槽一个齿距或转子斜与一个定子齿距相同角度永磁磁极，但这种斜槽的措施对电动机基波同样也有削弱，尤其是电动机每极每相槽数较少时，其对反电动势系数的影响较大；还可采用合理设计齿槽宽度及极弧系数，特殊槽形设计等方法。

3）分数槽绕组。电动机在采用分数槽时，极距不是齿距角的整数倍，不同极下的齿槽所处磁场位置不同，产生的齿槽转矩相位不同而相互抵消。分数槽绕组不能抵消的最低次数谐波为槽数和极数的最小公倍数次谐波，如8极9槽电机，不能消除的最小谐波次数是72次，也即是齿谐波基波的8次谐波，而齿谐波基波以及2～7次谐波都已被抵消；8极12槽电动机不能消除的是24次谐波，即齿谐波的2次谐波，显然这种选择对齿谐波的削弱没有前者好。因此，分数槽的合理选取是消除齿槽转矩的最有效方法之一。

4）无槽结构。在可能的情况下采用无槽结构设计，可从根本上消除齿槽转矩。但无槽电动机设计功率受到较大限制，且工艺上还有特殊的要求。

以上几种方法在设计时应综合考虑，它们大多会影响到电动机输出转矩的大小。如斜槽和斜极，增大气隙，减小气隙磁通密度等都将使电磁转矩降低；减小槽口宽度和增加磁性槽楔将增加工艺难度；分数槽绕组设计虽然有较多优点，但一般只适合于10kW以下的电动机；无槽结构也有一定的适用范围，一般用在功率较小的电动机中，几十千瓦以上的电动机较少采用。

5.3.2 工艺因素引起的转矩波动

机械加工和材料性能的不一致性等工艺因素也是引起转矩波动的重要原因之一。

（1）磁路不对称

引起磁路不对称的原因主要有磁极安装不对称、永磁体尺寸不一致、磁极充磁不均匀、永磁体的隐形缺陷或局部退磁等。

由磁路不对称引起的转矩波动具有周期性，其频率与极对数有关，也可能反应为与齿槽相关联的频率，对电动机的危害是引起振动或产生噪声。

消除办法主要是严格控制装配工艺，保证磁极安装时的几何位置对称性。同时控制永磁体的尺寸精度及磁性能的均匀性和一致性。

（2）定、转子不同轴

电动机加工时，定转子不可能保证完全同心，总会存在一定的偏心。综合磁路设计的各种因素，当这种偏心达到一定量时，也会产生转矩波动。

偏心引起的转矩波动是周期性的，其波动频率是基波极对数的倒数（$1/p$）。由于频率较低，因此偏心引起的转矩波动主要影响电动机的低速性能。

实际的电动机中偏心有多种情况，要区别对待，产生转矩波动一般是多种因素的叠加。应提高加工工艺水平，尽可能提高定转子同轴度来减小该类转矩波动。

（3）铁心扣片槽、焊接槽等工艺槽引起的转矩波动

当冲片由于叠片的需要而开有扣片槽或焊接槽等，在磁路饱和的情况下将引起转矩波动。

由扣片槽等工艺槽引起的转矩波动也是周期性的，且空载或静态时就存在，其波动频率与所开槽数和电机的极对数有关，一般情况下波动的基波是主磁场基波的倍频。

在工艺允许的前提下应尽可能开小槽或不开槽，以消除此类转矩波动。

（4）转子旋转体不光滑引起的转矩波动

由于转子旋转体表面不光滑，引起风摩擦损耗变化，也将产生转矩波动，这类转矩波动低速不明显，往往不被引起注意，但在要求速度较高的电动机中，它会引起较大的噪声和电动机损耗，电动机效率降低，高速性能变差。

5.3.3 电动机运行时电磁转矩的波动

按电磁转矩波动产生的原因可分为电磁因素引起的转矩波动、电流换相引起的转矩波动、电枢反应引起的转矩波动等。

电磁因素引起的转矩波动是由于定子电流和转子磁场相

互作用而产生的，它与气隙磁通密度的分布和电流的波形以及绕组的型式有直接的关系。

（1）方波驱动时的电磁转矩波动

方波驱动时，当反电动势波形为理想的120°梯形波，电流波形为理想的120°矩形波时，电磁转矩为恒定值，不会产生转矩波动。

在实际应用中，由于电感限制了电流的变化率，使灌入定子绕组的电流不可能是矩形波而是近似的梯形波。同样由于工艺等因素的影响，反电动势波形也不可能做到完全理想的120°梯形波，因此电磁转矩的波动是无法消除的。电流波形的上升（下降）时间越长（即换向角越大），电磁转矩波动越大，同时导致平均电磁转矩下降越多，将严重影响电动机的转矩、速度和位置伺服性能。

当极弧宽度增加时，电动机的电磁转矩增加，转矩波动减小，当极弧宽度达到1时，电动机出力最大，转矩波动为零。因此，虽然在实际电动机中极弧宽度不可能完全达到180°电角度，但可以尽量提高极弧系数，使其设计得接近于1，这样可达到降低电磁转矩波动的目的。

（2）正弦波驱动时的电磁转矩波动

正弦波驱动时，可通过设计力求保证反电动势波形为正弦波，在运行时控制电流使其尽可能逼近正弦，并通过矢量控制，使电流与反电动势相位角为零，从而使电磁转矩波动降至最低。

（3）电流换相引起的电磁转矩波动

正弦波驱动时，电动机三相绕组同时导通，在磁场定向控制时，如果反电动势与电流完全同相，则每个换相点都是在电动机相电流和相反电动势的自然过零点，电流不发生突变，并不会引起转矩波动。

方波驱动时，永磁无刷电动机每经过一个导通状态，定子绕组中的电流就要进行一次换相。电流从一相转移到另一相的过程中由于过渡过程的存在，不可能发生突变，因此不可能是理想的换相过程，从而带来电磁转矩的波动。

通过控制换相时的电流变化，可以大大地减小电动机的转矩波动，并增加电动机的出力。

（4）电枢反应引起的电磁转矩波动

电枢反应对电磁转矩的影响主要表现在使气隙磁场发生畸变，改变磁场的分布，引起气隙磁场不均匀、不对称或磁场局部饱和，从而使电磁转矩产生波动。

通常通过选择高性能磁性材料，采用瓦形或环形永磁体径向磁路结构，适当增大气隙等，可降低电枢反应引起的转矩波动。

5.3.4　控制器引起的转矩波动

电动机实际运行时，正弦波驱动时不能提供理想的正弦波，方波驱动时不能提供理想的方波，都会有转矩波动的产生。无论是什么波形都是由无刷电动机的控制系统所提供的，而无论任何系统都不可能提供绝对理想的波形，这是因为：

1）现代驱动控制系统都是采用PWM驱动，采用的是脉冲当量相等的原理，理论上就不是绝对平滑的正弦波或方波，而是等效的脉冲形式。

2）任何系统总是存在时间常数，信号的采样、处理等都需要一定的时间，因而电流和转矩及转速等都不可能绝对实时跟踪其变化，总存在延时。

3）出于逆变桥安全导通或其他安全保护功能的需要，在换相点，与逆变桥同桥臂的上下管之间必须避免直通，禁止同时导通而造成电流不连续。

5.4　设计特点

永磁无刷电动机的设计应首先确定电动机的控制策略和逆变器的容量，然后设计电动机。永磁无刷电动机根据其工作原理的不同可分为正弦波驱动和方波驱动两种。二者由于运行原理上的不同，因而在磁场、反电动势、电动机性能方面都有许多不同之处，因而在设计时不能采用相同的计算方法。

5.4.1　转子设计特点

永磁无刷电动机多采用钐钴（SmCo）和钕铁硼（NdFeB）等稀土永磁。转子部分由转轴、转子导磁体和永磁体等组成。为了减少惯量，有时在转子导磁体上钻若干孔，以减少有效质量。常见的转子结构有表贴式和嵌入式两种磁路结构，如图5.6-38和图5.6-39所示。

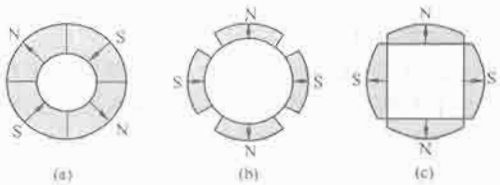


图5.6-38　表贴式永磁体转子结构

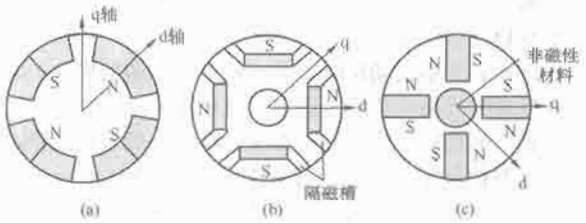


图5.6-39　嵌入式永磁体转子结构

图5.6-38为表贴式永磁体转子的几种典型结构。图5.6-38（a）为圆筒形整体结构，磁钢宽度与极距相等。忽略定子开槽和边缘效应时，气隙磁场为矩形波，当极对数较多，极弧较小时，每个磁极常采用一块永磁体；当电动机直径较大，而极数相对较少时，永磁磁极采用多块磁钢拼接而成，以达到径向充磁的目的。图5.6-38（b）和图5.6-38（c）所示永磁体形状分别为瓦片形和条形。极弧系数小于1，气隙磁场近似梯形波。这种转子结构的伺服电动机磁路结构简单。由于稀土永磁材料的相对磁导率 $\mu_r \approx 1$，故而电动机的径向等效气隙基本相同，交、直轴磁导也基本相等，$\lambda_d \approx \lambda_q$。

为了防止离心力将永磁体甩出，图5.6-38的结构需在转子外表面套一个0.3～0.8mm的紧固圈。紧圈材料通常采用不导磁的不锈钢，也可以用环氧无纬玻璃丝带缠扎。

图5.6-39为嵌入式永磁转子的几种典型结构。嵌入式转子结构整体强度较好，高速时无需对转子进行重新加固，且能根据需要设计成不同的气隙磁场型式，还可采用聚磁结构提高气隙的有效磁通。

嵌入式转子结构由于交、直轴气隙不同，故而产生凸极效应。如图5.6-39所示，这时d轴和q轴磁路的磁导不再相等，$\lambda_d \neq \lambda_q$。对于需要进行恒功率弱磁控制，扩大速度运行范围，提高最高工作转速时，采用此种结构较为适宜。

极弧系数的选取：方波驱动时，极弧系数越大越好，尽可能接近于1，且希望永磁体沿径向磁化；而正弦波驱动时将极弧系数选在0.8～0.85之间较为合适。

齿磁通密度的选取：电动机磁场变化，电枢反应的影

响，都将对电动机性能，尤其是转矩波动有较大的影响。因而为了减少磁场的变化及电枢反应的影响，设计电动机时，齿磁通密度不宜取得过高，磁路不宜过于饱和。

气隙磁通的计算：由于二者磁场波形不同，所以气隙磁通的计算也有所区别。方波驱动时气隙磁通可用下式计算

$$\Phi_\delta = \tau l_{ef} B_\delta \alpha_p \tag{5.6-24}$$

正弦波驱动时气隙磁通为

$$\Phi_1 = \frac{8}{\pi^2} \sin\left(\alpha_p \times \frac{\pi}{2}\right) \tau l_{ef} B_\delta \tag{5.6-25}$$

式中，Φ_δ 为方波驱动时的气隙总磁通；B_δ 为气隙磁通密度；τ 为极距；l_{ef} 为铁心有效长度；α_p 为计算极弧系数；Φ_1 为正弦波驱动时的基波气隙磁通。

对于表贴式转子结构，尤其是采用稀土永磁时，永磁体的相对磁导率很低，接近于空气，有效气隙可认为是

$$\delta_{ef} = \delta + h_m \gg \delta \tag{5.6-26}$$

式中，h_m 为磁钢厚度。

因而电枢反应的影响大大减少，在计算磁场工作点时，可只考虑空载的情况，负载的影响可忽略不计。在计算其他有关参数如磁导时，则应按等效气隙 δ_{ef} 考虑。

5.4.2 定子设计特点

确定电动机定子外径时，一般是在保证电动机足够散热能力的前提下，为了提高电动机效率而加大定子外径或为了减小电动机的制造成本而缩小定子外径。

设计永磁无刷电动机时，考虑到电压拉偏的影响，最大工作速度时的反电动势最大值取供电电压的 65%～80%。

正弦波驱动时，为了削弱谐波，绕组一般采用短距分布绕组或分数槽绕组，这时电动机的反电动势基本上为正弦波，绕组联结方式既可采用Y联结，也可采用△联结；方波驱动时，为了产生所要求的梯形波反电动势，绕组一般采用整距，且常取每极每相槽数 $q=1$ 或 2。为了减少电动机转矩波动和增加电动机的输出转矩，绕组一般采用Y联结方式。

在保证磁场设计的情况下，Y联结方波驱动时电动机的反电动势为相反电动势幅值的 2 倍。一旦电动机的主要尺寸确定，反电动势大小与气隙磁通密度或基波磁通和每相串联匝数成正比。电动机采用稀土永磁材料时，气隙磁通密度的范围约在 0.55～0.8T 之间。电动机转速一定，每相串联匝数 W 决定了电动机反电动势的大小，而反电动势的选取又与伺服放大器的母线电压有关；同时每相串联匝数 W 又与电动机的电阻、电感和电气时间常数等参数有关。理论上讲，电动机的电阻、电感和电气时间常数越小越好，但对整个系统就不能一概而论。因为伺服放大器供给伺服电动机两端的电压为 PWM 或 SPWM 调制波，由一系列脉冲组成，电流总是处于一个上升与下降的动态过程中，如果电阻和电气时间常数过小，则电流幅值上升及下降很快，而系统的调制频率不可能太高，致使电动机电流出现较大的尖峰，超过数倍额定电流，甚至使电流不再连续。这将使系统可靠性降低，性能精度下降，抗干扰能力减弱，亦会因电流谐波增大而引起铁心损耗增加，发热上升，效率降低等。因此，这些参数应根据系统的整体要求统一设计，而不应将伺服放大器和电动机分离开，去追求某一方面的效果。

电动机的损耗主要有铁损耗和铜损耗两部分。对铜损耗的计算，可近似采用一般电动机的计算方法，只是注意电流要取有效值。但对铁损耗则要进行分析。正弦波驱动时，加在电动机两端的电压为 SPWM 调制波。根据分析可知，如果能进行良好的控制，可大大削弱或抑制 $(2N-1)$ 次以下的各次谐波（N 为与调制频率和电机转速有关的常数）；方波驱动时，除了 $(2N-1)$ 次谐波外，还存在很多次谐波，如 5、7、11 次等。因为这时电动机端子上加的是 PWM 电压调制波形，同时由于转子磁场为方波，所以也存在如 3、5、7、11 次较大的谐波。这些谐波对电机性能产生一定的影响。方波驱动时，合理地利用各次谐波能改善电动机的转矩波动、增加电动机的输出转矩，但同时也引起铁心损耗增大，电动机发热，效率下降。而正弦波驱动时就好得多。因而在计算电动机的铁心损耗时，除了考虑基波引起的基本铁损耗外，还必须考虑谐波引起的铁损耗。

6 特种永磁无刷电动机

新材料、新技术的应用，设计理论的发展以及市场对无刷电动机的推动，使永磁无刷电动机的结构不断更新，工艺不断革新。高性能磁性材料的发展，使大气隙结构电动机成为可能。出现了诸如永磁无刷力矩电动机、永磁无铁心无刷电动机、永磁盘式无刷电动机、永磁无槽无刷电动机等采用不同结构、工艺制造的无刷电动机。

6.1 永磁无刷力矩电动机

无刷力矩电动机的外特性和用途均与直流力矩电动机相同。在控制系统中，它也可直接驱动机械负载，常工作于低速，可长期堵转工作。

无刷力矩电动机的工作原理与永磁无刷电动机的完全相同，也有矩形波驱动和正弦波驱动两种工作方式，只不过它的最高工作转速通常在每分钟数百转之内，在设计上追求堵转下有较大输出力矩和尽可能小的输入功率，追求力矩/质量比。

由于需要较低的额定转速和较大的输出力矩，无刷力矩电动机常设计成有较多的极对数和较大的直径/长度比；和直流力矩电动机相仿，常采用分装式结构。无刷直流力矩电动机产品多采用三相绕组，转子为一个有大直径内孔的环行支架，其上粘贴永磁体。位置传感器可采用霍尔传感器、光电编码器和旋转变压器等。

为了保证超低速下工作的平稳性，应更加重视转矩波动问题。无刷力矩电动机也可采用高磁能积稀土永磁材料，定子采用无槽电枢绕组，以完全消除定子铁心齿槽引起的转矩波动。

国外知名公司有无刷力矩电机系列产品，电动机外径为 21～4000mm，转矩为 0.1～1000N·m，内、外转子多达近百种规格。国内无刷力矩电动机已做到 15000N·m。

6.2 无铁心永磁无刷电动机

无铁心永磁无刷电动机的出现是采用新材料、新工艺的结晶。电枢采用耐热性能优越的材料制成的刚性整体，可以在高温及高速情况下长期稳定运行；由于电枢无铁心，电感的影响小，起动、转速调节时响应性能优异，有利于控制电路的设计，具有优异的控制性能；完全消除了铁心中的磁滞损耗和涡流损耗，消除了由齿槽效应带来的转矩波动，具有更高的运行效率、更平稳的运行状态、更低的温升和更宽广的转速范围；电动机的电枢中无齿槽且采用全塑封结构，负载运行时，噪声及振动都很低；具有较硬的机械特性，负载变化时，转速的变化率小。

根据电动机用途不同，无铁心永磁无刷电动机可采用轴向磁场结构和径向磁场结构。轴向磁场结构的无铁心永磁无刷电动机，电枢绕组径向按一定规律分布，在专用模具中固化成形，电枢两侧均为盘状转子体，转子磁体为轴向磁化，

两侧转子可同时布置永磁体磁极及转子轭，成双励磁转子结构，也可一侧布置永磁体磁极，而另一侧布置转子磁轭，成单励磁转子结构。径向磁场结构的无铁心无刷电动机，电枢绕组轴向按一定规律分布成筒状，其电枢内、外圆处均为筒状转子体，转子磁极为径向磁化，内、外圆可同时布置永磁体磁极及转子轭，成为双励磁转子结构，也可在其中一个圆周上布置永磁体磁极，而另一个圆周上只布置转子磁轭，成为单励磁转子结构。径向磁场结构和轴向磁场结构均可根据要求制造成内转子和外转子结构。图 5.6-40 所示为径向磁场结构的无铁心永磁无刷电动机结构示意图。

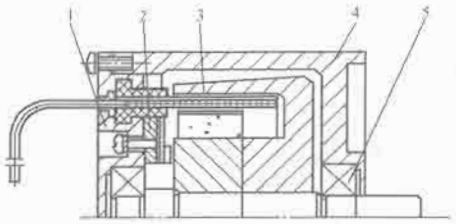


图 5.6-40　无铁心永磁无刷电动机结构图
1—后端盖组件；2—传感器组件；
3—轴组合；4—机壳；5—轴承

无铁心永磁无刷电动机定子绕组的绕制必须保证绕组元件位置正确，保证多相绕组在空间对称分布。电枢固化采用专门的模具和工艺，确保电枢尺寸符合要求。

6.3　盘式永磁无刷电动机

典型盘式永磁无刷电动机结构如图 5.6-41 所示。其定子、转子均为圆盘形，采用轴向气隙磁场，可做成有铁心和无铁心两种结构，定子绕组呈径向分布。

盘式永磁无刷电动机采取盘式结构，轴向尺寸短，结构紧凑，被广泛地用于视听设备、计算机外部设备和信息处理机械等领域。

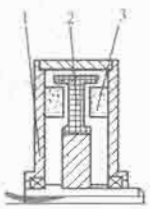


图 5.6-41　典型盘式永磁无刷电动机结构
1—端盖；
2—电枢组件；
3—永磁体

6.4　无槽永磁无刷电动机

将无槽结构引入到永磁无刷电动机中，做成无槽结构永磁无刷电动机，不仅具有普通永磁无刷电动机调速性能好、可靠性高、免维护和无换向火花等优点，而且消除了齿槽效应，具有转矩波动小、运行平稳、噪声低、电枢电感小、定位干扰力矩小等一系列优于普通永磁无刷电动机的优点，成为很有发展前景的永磁无刷电动机。

小直径的电动机采用无槽结构能获得比有槽结构更大的转矩指标。在特殊条件下，例如要求电动机的转矩和功率相对不大，对电动机的体积限制不严，而对电动机的控制要求很高的情况下，采取无槽结构会获得好的效果。图 5.6-42 所示为典型无槽永磁无刷电动机结构。

国内无槽永磁无刷电动机已有系列产品，功率范围至 3kW，最高转速可达 20000r/min，机座号为 ϕ28～ϕ190。

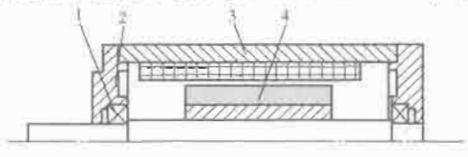


图 5.6-42　典型无槽永磁无刷电动机结构
1—轴承；2—端盖；3—机壳组件；
4—永磁体组件

7　应用领域

7.1　计算机外围设备

硬盘驱动器是一种高度精密的机电一体化产品。随着硬盘容量的不断增大，要求磁盘的转速相应提高，因此也带来了机械磨损加剧、温度升高、噪声增大等一系列负面影响，而采用了无刷电动机，在结构上可省略电刷、减少机械磨损，从而达到降温、减噪、提高效率的目的。特别是由于电子元器件技术和工艺性的提高，使无刷电动机已成为一种十分理想的驱动元件。

硬盘驱动中主轴电动机的结构一般都采用外转子结构，分为内藏式和扁平式两类。内藏式电动机的转子外径同磁盘盘片的内径相匹配，电动机长度则同它所带动的盘片数有关。随着驱动器的微型化，盘片直径在不断减小，给这类电动机的设计带来很大困难。故一般只适用于盘片直径大于 8.9cm（3.5in）硬盘驱动器上，通常采用三相 9 槽 8 极结构。

随着数据存取容量增加、存取速度加快以及盘片直径的不断缩小，要求硬盘驱动器中主轴电动机的运行转速越来越高，已从原来的 3600r/min 提高到 4500r/min、5400r/min、7200r/min，甚至 10000r/min。目前硬盘的规格主要有 8.9cm(3.5in)、6.4cm(2.5in)、4.6cm(1.8in)等多种，全球年销量高达数亿台。

近年，永磁无刷电动机采用外转子结构并直接驱动软磁盘，定子结构一般采用 9～12 槽，三相星形绕组通用型结构；也有采用由 6 个平面印制绕组分布在一个圆盘上，120 根导体均匀依次串联，3 个霍尔元件作位置检测信号，4 对轴向充磁磁钢安装在另一个圆盘上的扁平结构。

光盘驱动器的电动机结构一般均采用三相星形联结的外转子式永磁无刷电动机，具有高效、低耗、低噪声、长寿命等优点。电动机的外形结构为 ϕ28.5mm × 18.25mm、ϕ29mm × 20.8mm，电压有 5V、8V、12V，额定转速有 2500r/min、4800r/min、8000r/min、8500r/min，要求能稳定运行，负载转矩为 1.47～4.9mN · m。

随着计算机芯片集成度的大幅度提高，单位面积内的管芯成倍增加，但随之而来的是芯片功耗的急剧增加，芯片内的发热量也急速上升。为了降低主机芯片温升，在其 CPU 上往往需要安装专用冷却风扇。此外，为了降低整个机箱内温升，也需要安装风扇。因此，通风冷却装置就成了现代计算机中必不可少的装置，而它的驱动电动机都采用永磁无刷电动机。

7.2　声像设备

从近 30 年的发展来看，录像机采用的微特电机经历了两个重要阶段。第一阶段是黑白录像机时期，时间是从 20 世纪 70 年代初期到 80 年代中期，采用有刷永磁直流伺服电动机或磁滞同步电动机驱动磁鼓和磁带。由于直流电动机存在着火花干扰大、寿命短、整机可靠性低的缺点，而磁滞同步电动机受负载变化的影响较大，虽然采取了转速补偿措施，仍由于体积大而遭淘汰。第二阶段是彩色录像机时期，时间是 20 世纪 80 年代后期，由于永磁无刷电动机具有上述两种电动机无法取代的优点，电控技术和电子元器件日益成熟，而且具备了批量生产的条件，因此，录像机的磁鼓和磁带分别用 2 台永磁无刷电动机驱动。录像机用电动机的种类

很多，在结构上电动机从圆柱形向扁平形发展；在驱动方式上，由间接驱动向直接驱动发展。

7.3 家用电器

目前，以变频空调器、变频冰箱、变频洗衣机为代表的变频家用电器逐步进入我国消费市场，而且变频家用电器正在由“交流变频”向俗称的“直流变频”转变，已是明显的发展趋势。这种转变实际上就是变频家电用变频空调压缩机、变频冰箱压缩机、空调用室内外风机、空气清新换气扇、变频洗衣机所用的电动机，过去是单相感应电动机或 VVVF 变频器供电的感应电动机，现已被永磁无刷电动机及其控制器所取代。这种由“交流变频”向“直流变频”的转变使变频家用电器在节能高效、低噪声、舒适性、智能化等方面都有新的提高。1998 年以来，我国变频空调发展迅速，空调开始了直流化进程。无刷电动机在宽的转速范围内可以获得较高的效率，更适合家电的需要。日本的变频空调的全直流化早已批量生产。我国的变频压缩机厂家已开始采用无刷电动机来代替三相交流感应电机，将出现以永磁无刷电动机驱动压缩机和室内外风机的所谓全直流化空调，更节能，更舒适。

空调器室外风机中采用无刷电动机的越来越多，如室外风扇采用 20W 无刷电动机，额定电压为 230V，定子为 12 槽，采用嵌入式槽绝缘，三相集中绕组，星形联结，转子采用圆环黏结铁氧体，8 极，无位置传感器，采用反电动势换相技术。也有采用外转子结构的永磁无刷电动机，用于空调器换气离心式风机。该电动机定子铁心为 9 槽，采用三相集中绕组、星形联结，转子极数有 6 极和 12 极两种，采用黏结钕铁硼永磁材料，转速为 1000～6000r/min。

洗衣机一般采用低噪声扁平型永磁无刷电动机，不带任何机械减速和传动装置由永磁无刷电动机直接驱动洗衣机滚筒，并采用无级调速，洗衣时低速运转，脱水时高速运转，故障率很低，同时采用了模糊控制技术，提高了技术档次。洗衣机采用无刷电动机和 PWM 控制技术，洗涤速度和节拍可同时改变，控制灵活，可根据衣物质地选择不同的脱水转速，达到了高洗涤、低磨损、免缠绕的效果。洗涤噪声 59dB 以下，比普遍洗衣机下降 10dB，电动机寿命比传统的感应电动机延长 200%，能耗降低 50%以上。这类电动机一般采用外转子结构，定子铁心采用带料冲槽，充分利用材料。典型规格铁心长度为 26mm，36 槽，采用三相集中绕组，星形联结，转子 24 极，采用铁氧体永磁材料。

7.4 办公设备

作为代表性的办公设备有传真机、复印机、打印机等。办公设备有读取文字和图像信息的功能，以及把文字和图像在纸上再现的功能。读取信息时，主扫描机构把图像沿纸的横向按扫描线粗细逐条读入。办公设备一般使用直线图像传感器（CCD）。为了读取下一条线的图像信息，由电动机驱动实现逐线进纸，叫做副扫描。把图像记录到纸上时，在主扫描方向有按整纸宽配置热敏磁头和 BSED（发光二极管）或液晶曝光盘的方式，有用输送电动机驱动印刷磁头的方式、有激光和扫描仪电动扫描的方式。副扫描方向都是用电动机驱动，根据高品质的要求严格控制进纸的精度。

办公设备中一般使用步进电动机和直流电动机，对于要求驱动转矩高而驱动动作幅度小的部分，使用永磁无刷电动机。

7.5 电动自行车

目前，用于电动自行车上的电动机有直流电动机和不带减速齿轮的直接驱动的永磁无刷电动机。后者的转子磁钢采用钕铁硼永磁材料，电动机效率高，体积和质量减小。电动自行车电动机的开发和生产速度很快。日本公司开发的永磁无刷电动机，转子采用非导磁的不锈钢，将稀土磁体包卷嵌入转子叠片中，在结构上将减速齿轮和换相控制电路均装在同一机壳内，坚固可靠，输出转矩大，效率高（超过 85%）。目前已有 4 种产品：电压 24V，功率 150W 和 200W；电压 48V，功率 300W 和 600W，可用在电动自行车、残疾人用的电动车和电动摩托车上。电动自行车的车速一般限制在 20km/h，所采用的永磁无刷电动机的功率一般不大于 200W。

7.6 工业驱动和控制

20 世纪 90 年代以来，在高精度的机床数控设备进给伺服控制中相当多地采用了无刷电动机取代宽调速的直流伺服电动机。近年来，在新一代数控机床的进给伺服控制中采用永磁无刷电动机，提高了数控机床的快速性和加工效率，已成为新的研究和应用热点。在军用和工业用机器人和机械手的驱动中，无刷电动机的应用相当广泛。目前全世界机器人的拥有量已经超过 100 万台，且每年以大于 20%的速度增长。这已经成为无刷电动机的主要应用领域之一。大功率无刷电动机在低速、环境恶劣和有一定调速性能要求的场合有着广泛的应用前景，如钢厂的轧机、水泥窑传动、抽水蓄能等。

近年出现的最新一代电梯无齿轮曳引机，与感应电动机变频驱动的交流曳引机相比有更优异控制性能，高效率、低噪声、小体积、轻质量，迅速被国际知名电梯公司重视，纷纷开发出自己的无齿轮曳引机电梯，推向高端市场。

此外，永磁无刷电动机在纺织机械、印刷机械、包装机械、冶金机械、邮政机械、电动汽车/健身设备以及自动化流水生产线和各种专用设备有广泛的应用。

8 典型规格技术数据

1）ZW 系列空调用无刷电动机的主要技术数据（见表 5.6-1）。

表 5.6-1 ZW 系列空调用无刷电动机的主要技术数据

型 号	电压（V）	额定转矩（N·m）	转速（r·min）	电流（A）	噪声[dB(A)]
64ZWTG01	30	0.11	1450	1.2	≤33
64ZWTG02	38	0.072	2200	0.85	≤35
92ZWTN01	30	0.075	1500	0.75	≤30
92ZWTN02	35	0.125	1550	1.02	≤30
92ZWTN03	48	0.185	1600	1.12	≤30
98ZWTCG01	220	0.5	1180	0.45	≤35
98ZWTCG02	110	0.2	3000	0.8	≤42

2）洗衣机中用永磁无刷电动机主要技术数据（见表 5.6-2）。

表 5.6-2 洗衣机中用永磁无刷电动机主要技术数据

型 号	VM-DD1	VM-DD2
电动机型式	三相永磁无刷电动机	
极 数	24 极	
额定力矩（N·m）	18.6/1.8	16.0/1.6
额定转速（r/min）	125/950	
驱动电压（V）	≤DC310	
绝缘等级	B 级	

3）电动自行车用无刷电动机主要技术数据（见表 5.6-3）。

4）汽车、电梯、建筑、健身、石油机械等用途永磁无刷电动机典型规格（见表 5.6-4）。

表 5.6-3　　电动自行车用无刷电动机主要技术数据

型　号	额定电压 (V)	额定转速 (r/min)	稳定电流 (A)	效率 (%)	额定功率 (W)	安装位置
ZWXZ180-36	36	180	4.8	75	130	前后轮
ZWXZ130-24	24	180	7.5	73	130	前后轮
ZWXZ180-36	36	220	6.4	78	180	前后轮
ZWXZ500-36	36	400	11.8～17	82	350～500	踏板车后轮
ZWXZ500-48	48	450	8.9～12.7	85	350～500	踏板车后轮

表 5.6-4　　汽车、电梯、建筑、健身、石油机械等用途永磁无刷电动机典型规格

型　号	额定功率(kW)	额定转速(r/min)	额定转矩(N·m)	电源电压(V)	用　途
BS1.0/1900	1.0	1900	5.0	48	牵引电动机
BS1.5/6500	1.5	6500	2.2		
BS1.5/1500	1.5	1500	0.6		
BS2.2/1500	2.2	1500	14.0		
BS3.0/1450	3.0	1450	19.8		
BS3.0/955	3.0	955	30.0		
BS3.0/1500	3.0	1500	19.1	72	牵引电动机
BS3.4/2000	3.4	2000	16.2		
BS4.0/3000	4.0	3000	12.7		
BS4.0/1000	4.0	1000	40		
BS5.0/1500	5.0	1500	31.8		
BS5.0/2100	5.0	2100	22.7		
BS2.0/2830	2.0	2830	6.75	300	牵引电动机 电动汽车
BS2.2/1500	2.2	1500	14.0		
BS3.5/3500	3.5	3500	9.6		
BS5.0/2500	5.0	2500	19.1		
BS7.5/3500	7.5	3500	20.5		
BS7.5/2500	7.5	2500	28.7		
BS15/4000	15.0	4000	35.8		
BS30/3500	30.0	3500	82.0		
BS80/3500	80.0	3500	218.0		
BS120/4000	120.0	4000	286.0		
BS4.5/3000	4.5	3000	14.3	285～450	制动用空压机
BS2.0/850	2.0	$n_N=850$ $N_{max}=3500$	$T_N=22.5$ $T_{min}\geq 4.2$	285～450	转向增力油泵
BS2.0/2830	2.0	2830	6.8	250～420	汽车空调器
BS7.5/2500	7.5	2500	28.7	250～420	汽车空调器
BS0.5/3000	0.5	3000	1.6	77～130	风机
BS0.15/900	0.15	900	1.6	220～50/60Hz	电梯
BS0.55/5000	0.55	5000	1.1	220V 50Hz	离心机
BS0.7/16000	0.70	16000	0.42	220V 50Hz	离心机
BS1.5/8000	1.50	8000	1.8	380V 50Hz	搅拌机
BS2.2/8000	2.2	8000	2.6	220V 50Hz	泵和压缩机
BS5.5/8000	5.5	8000	6.6	380V 50Hz	
BS7.5/8000	7.5	8000	9.0	220V 50/60Hz	
BS11/8000	11.0	8000	13.2	380V 50/60Hz	
BS22/8000	22.0	8000	26.3	380V 50/60Hz	
BS1.1/437	1.1	437	24	380V 50Hz	陶瓷机械
BS1.6/463	1.6	463	33	380V 50Hz	陶瓷机械
BS0.37/35	0.37	35	100	220V 50Hz	卷绕机
BS5.5/4000	5.5	4000	13.1	220V/380V 50Hz	油泵试验台
BS2.2/1500	2.2	1500	140	380V 50Hz	注塑机
BS30/1500	30	1500	191	380V 50Hz	石油机械
BS0.5/3000	0.5	3000	1.6	220V 50Hz	铁道
BS1.5/3000	1.5	3000	4.78	220V 50Hz	自动维护车
BS0.35/3500	0.35	3500	0.96	160～220V_{DC}	铁路道岔机
BS4/1500	4.0	1500	25.5	380V 50Hz	挤压机
BS0.14/15000	0.14	15000	0.09	220V 50Hz	呼吸机
BS1.1/3400	1.1	3400	3.1	220V 50Hz	跑步机
BS1.5/3400	1.5	3400	4.8	220V 50Hz	跑步机
BS2.2/3400	2.2	3400	6.2	220V 50Hz	跑步机

第7章 伺服电动机控制系统

1 概述

伺服电动机控制系统即伺服系统（伺服控制技术）是自动化学科中与产业部门联系最紧密、应用最广泛的一个分支。自从第二次世界大战期间雷达和火炮伺服系统出现以来，在近半个世纪中，伺服控制技术及其系统在工业、农业、国防等各个领域都得到了广泛的应用。伺服控制经历了发电机-电动机系统、交磁电机扩大机控制、晶闸管控制、集成电路控制和计算机控制的发展过程，至今已经进入一个全新的鼎盛时期。反映这一时期的现代伺服控制技术及其系统的主要特征可以概括为：全控型电力电子器件组成的脉冲宽度调制（PWM）技术在伺服功率驱动中的广泛应用；微处理机特别是数字信号处理器（DSP）在伺服系统中的普遍应用，使得现代控制理论逐渐工程实用化；各种伺服控制元件与线路向着集成化、数字化、功能化、模块化、智能化方向发展；伺服控制系统的可靠性设计及其诊断技术伴随着系统功能、性能及其复杂化程度的升级而受到人们的普遍重视。

1.1 作用及组成

在自动控制系统中，输出量能够以一定准确度跟随输入量的变化而变化的系统称为随动系统，亦称伺服系统。例如，数控机床的伺服系统是指以机床移动部件的位置和速度作为控制量的自动控制系统。

伺服系统的作用在于接收来自上位控制装置的指令信号，驱动被控对象跟随指令运动，并保证动作的快速和准确，这就要求高质量的速度和位置伺服。一般较复杂的自动控制系统的精度和速度等技术指标往往取决于其中所使用的伺服系统。

典型的伺服电动机控制系统如图 5.7-1 所示。由图可见，整个伺服系统由伺服电动机、传感器和驱动器组成。

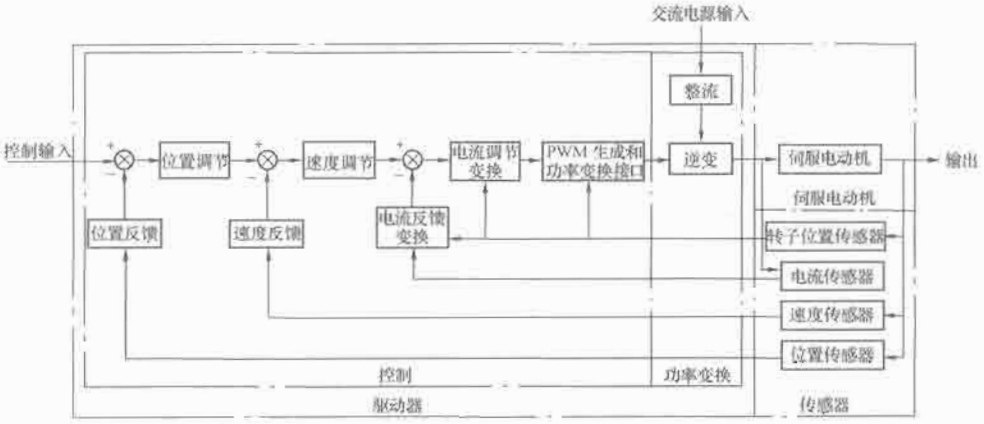


图 5.7-1 伺服电动机控制系统

伺服电动机包括永磁无刷电动机、直流伺服电动机、感应电动机、两相交流伺服电动机等。下面以永磁无刷电动机为例，介绍系统的组成和部件的功能。永磁无刷电动机主要由转子和定子两大部分组成，在转子上装有特殊形状的永磁体，用以产生恒定磁场。转子上的永磁材料可以用铁氧体或稀土永磁材料。高性能而价格适宜的永磁材料，为提高电动机的伺服性能和实用化提供了条件。由于转子上没有励磁绕组，由永磁体产生磁场，因而不需要引入励磁电流，电动机内部的发热只取决于电枢电流。在电动机的定子铁心上绕有三相电枢绕组，接在伺服驱动器上。在结构上，定子铁心散热情况良好，也使电动机易于实现小型化和轻量化。

传感器包括位置传感器、速度传感器和电流传感器。在永磁无刷电动机中还包括转子位置传感器，其作用是检测转子磁极相对于定子绕组的位置，为驱动器提供正确的换相信息。位置传感器、速度传感器、转子位置传感器常采用接近开关、光电编码器、正余弦旋转变压器、霍尔元件、磁/电变换元件等。无位置传感器检测是通过检测和计算与转子位置有关的物理量而间接地获得转子位置信息，主要有反电动势检测法、续流二极管工作状态检测法和瞬时电压方程法等。一般采用霍尔元件检测转子位置的最多，而正弦波驱动时则采用正余弦旋转变压器、光电编码器等高精度位置传感器。实际上，这些功能可用一个光电编码器或旋转变压器来完成，至少一个检测器需要完成两种功能。多种功能用一个传感器来实现，可以减小电动机的轴向尺寸，并能简化控制和安装。电流传感器常采用电阻片、霍尔传感器等，其主要作用是检测伺服电动机绕组的电流，进行电流的有效控制。

驱动器接受控制输入指令，可实现对电动机的转矩、速度、转子位置控制。它主要包括控制和功率变换（主电路）两大部分。控制部分主要由三闭环控制器（即电流控制器、速度控制器和位置控制器）以及与其相应的基准信号产生、反馈信号检测、处理电路等组成。位置控制是外环，速度控制是中环，转矩或电流控制是内环。一般情况下，速度控制器为 PI（比例-积分）控制规律，它的输出为电流指令（直流量）。速度控制器的作用主要是为了能进行稳定的速度控制，以使其在定位时不产生振荡。在伺服系统中，为了进行位置控制，要求速度环能有快速响应速度指令的能力，并且在稳态时具有良好特性硬度，对各种扰动具有良好的抑制作

用。电流控制器作为速度环的内环，在输入端综合电流指令信号和反馈信号，使电枢绕组中的电流在幅值和相位上都得到有效控制，完成与磁通矢量的正交或弱磁高速控制，电流控制器通常也采用 PI 控制规律，要求它具有更高的快速性，以适应对电流瞬时值跟踪控制的要求。功率变换主要由整流（器）和逆变（器）两部分组成，整流器将输入的三相交流电整流成直流电，经过电容器滤波平滑后提供给逆变器作为它的直流输入电压。逆变器（电路）的作用是在脉冲宽度调制（以下称 PWM）控制信号的驱动下，将输入的直流电变换成可调的直流或交流电，输入到伺服电动机的电枢绕组中，即 PWM 生成电路以一定的频率产生出触发功率逆变器的控制信号，使功率逆变器的输出电压可调或输出频率和电压保持协调关系，并使流入电枢绕组中的电流保持恒定或交流电流保持良好的正弦性。在伺服系统中，对应于不同的伺服电动机虽然其工作原理有所不同，但驱动器的结构和控制方法以及相关外围电路和配置基本相同。

本章主要讨论伺服电动机驱动器原理及组成，其他见本篇有关章节。

1.2　基本要求和特点

1.2.1　基本要求

1）稳定性好。稳定性是指系统在给定输入或外界干扰作用下，能在短暂的调节过程后到达新的或者回复到原有的平衡状态。

2）精度高。伺服系统的精度是指输出量跟随输入量的精确程度。体现了伺服系统的控制能力，包括静态指标和动态指标两方面，用输入和输出的偏差来表征。静态指标要求恒定偏差趋于零，动态指标要求跟踪偏差越小越好。

3）快速响应性好。快速响应性是伺服系统动态品质的标志之一，即要求跟踪指令信号的响应要快，一方面要求过渡过程时间短，一般在 200ms 以内，甚至为几十毫秒至几毫秒；另一方面，为了满足超调要求，要求过渡过程的前沿陡，即上升率要大。

1.2.2　主要特点

1）精确的检测装置。用以组成速度和位置闭环控制。

2）有多种反馈比较原理与方法。根据检测装置实现信息反馈的原理不同，伺服系统内反馈的方法也不相同。目前常用的有脉冲比较、相位比较和幅值比较三种。

3）高性能的伺服电动机。伺服系统在工作中经常处于频繁地起动和制动过程中，要求电动机的输出转矩与转动惯量的比值大，以产生足够大的加速度或制动转矩。要求伺服电动机在低速时有足够大的输出转矩且运转平稳，以便在与机械运动部分连接中尽量减少中间环节。

4）宽调速范围的速度调节系统（速度伺服系统）。从系统的控制结构看，位置闭环系统可以看作是位置调节为外环、速度调节为内环的双闭环自动控制系统。其内部的实际工作过程是把位置控制输入转换成相应的速度给定信号后，再通过调速系统驱动伺服电动机，实现实际位移。

1.3　主要技术指标

1.3.1　转速波动

电动机稳态运行时，瞬态转速的最大值为 n^*_{max}，最小值为 n^*_{min}，则转速波动为

$$K_f = \frac{n^*_{max} - n^*_{min}}{n^*_{max} + n^*_{min}} \times 100\% \tag{5.7-1}$$

1.3.2　转矩波动

电动机稳态运行时，对电动机施加恒定负载，连续测量输出转矩，瞬态转矩的最大值为 T^*_{max}，最小值为 T^*_{min}，则转矩波动为

$$\text{转矩波动} = \frac{T^*_{max} - T^*_{min}}{T^*_{max} + T^*_{min}} \times 100\% \tag{5.7-2}$$

1.3.3　正反转速差

对于速度闭环的伺服系统，不改变速度指令的量值，仅改变电动机的转动方向，空载条件下，测量出电动机的正反转速 n_{cw} 和 n_{ccw}，按照下式计算正反转速差

$$\text{正反转速差} = \frac{|n_{cw} - n_{ccw}|}{n_{cw} + n_{ccw}} \times 100\% \tag{5.7-3}$$

1.3.4　转速变化率

系统在某一给定转速下，负载由空载变化到最大连续转矩所对应的负载，其转速变化的相对值叫做转速变化率 s，即

$$s = \frac{n_0 - n_L}{n_0} \times 100\% \tag{5.7-4}$$

式中，n_0 为空载下的转速；n_L 为负载下的转速。

1.3.5　调速比

系统满足规定的转速变化率和规定的转矩波动（或转速波动）时的最低空载转速 n_{min} 和额定转速 n_N 之比叫做调速比，即

$$D = \frac{n_{min}}{n_N} \tag{5.7-5}$$

1.3.6　超调量

对于阶跃响应，为偏离输出变量最终稳态值的最大瞬时偏差，通常以最终稳态值与初始稳态值之差的百分数表示，如图 5.7-2 所示。

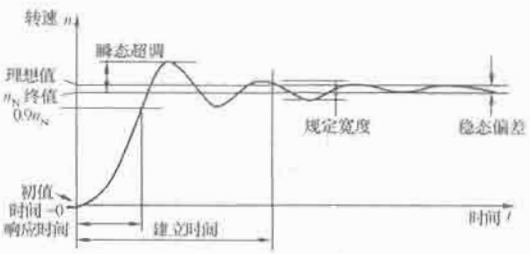


图 5.7-2　阶跃输入的时间响应曲线

1.3.7　阶跃输入的转速响应时间

系统输入由零到对应 n_N 的正阶跃信号，从阶跃信号开始至转速第一次达到 $0.9n_N$ 的时间，如图 5.7-2 所示；系统输入由对应 n_N 到零的负阶跃信号，从阶跃信号开始至转速第一次达到 $0.1n_N$ 的时间。上述正、负阶跃过程中规定的时间称为阶跃输入的转速响应时间。

1.3.8　转矩变化的时间响应

系统正常运行时，对电动机突然施加转矩负载或突然卸去转矩负载，电动机转速随时间的变化叫做系统对转矩变化的时间响应，如图 5.7-3 所示。

1.3.9　建立时间

从一个输入变量发生阶跃变化的瞬间起，至输出变量偏离其最终稳态值与初始稳态值之差不超过 ±5% 的瞬间止的持续时间间隔。

系统中转速发生阶跃变化的建立时间称为转速建立时间，如图 5.7-2 所示。

系统中转矩发生阶跃变化的建立时间称为转矩变化的转速建立时间（恢复时间），如图 5.7-3 所示。

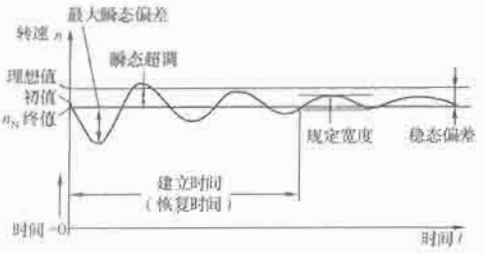


图 5.7-3 突加负载的时间响应曲线（输入不变）

1.3.10 频带宽度

系统输入量为正弦波，随着正弦波信号的频率逐渐升高，对应的输出量的相位滞后逐渐增大，同时幅值逐渐减小，相位滞后增大至 90°时幅值减小至低频段幅值 $1/\sqrt{2}$ 时的频率称为系统的频带宽度。

1.3.11 静态刚度

在位置控制方式下，系统处于空载零速工作状态，对电动机轴端正转方向或反转方向施加连续转矩 T_0，测量出转角的偏移量 $\Delta\theta$，则静态刚度为

$$K_s = \frac{T_0}{\Delta\theta} \tag{5.7-6}$$

若转角采用分为单位，则静态刚度的单位为 N·m/(′)。

1.4 分类

伺服系统按调节理论分为开环伺服系统、半闭环伺服系统、闭环伺服系统；按使用的执行元件分为步进电动机伺服系统、直流伺服电动机伺服系统、永磁无刷电动机伺服系统、感应电动机伺服系统等。由数字信号处理器构成的全数字永磁无刷电动机伺服系统由于具有众多的优点，已成为发展的主流。

2 逆变技术

与整流相对应，把直流电变成交流电称为逆变。逆变主要分为电压型和电流型，两种类型的区别在于直流环节采用怎样的滤波，前者采用大电容滤波，后者采用大电感滤波。在伺服系统中，常采用电压型逆变器电路，其大多由全控型电力电子器件（功率开关管）组成。图 5.7-4 为电压型三相逆变器原理图，该电路无论是稳定工作状态还是换相工作状态，电容 C 总是力图维持逆变部分的输入直流电压 U_d 为恒值，所以称为电压型逆变器。

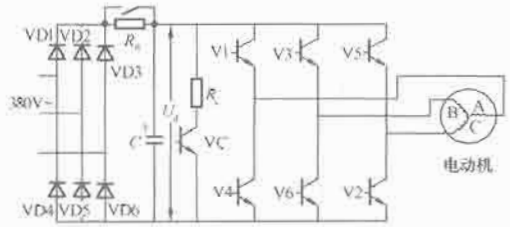


图 5.7-4 电压型三相逆变器原理图

为使伺服电动机具有伺服的性能，就是利用逆变技术，使伺服电动机绕组产生所需要的具有一定幅值或幅值和相位的电流波形，从而达到线性控制转矩的作用。在直流伺服电动机伺服系统中，采用单相全桥（H 桥）逆变电路，在永磁无刷电动机和感应电动机伺服控制中，采用三相全桥逆变电路。

由于逆变器中功率开关管的存在，在恒定的直流输入电压作用下，逆变器可以通过自身的多次开关控制输出电压并优化输出谐波。有许多种类的逆变技术，在伺服系统中常采用瞬时电流控制正弦脉冲宽度调制（SPWM）技术，而在全数字正弦波驱动永磁无刷电动机系统中常采用电压空间矢量脉冲宽度调制（SVPWM）技术。

2.1 逆变器的基本工作原理

以瞬时电流控制 SPWM 为例。电压型三相逆变器基本工作原理如图 5.7-5 所示。

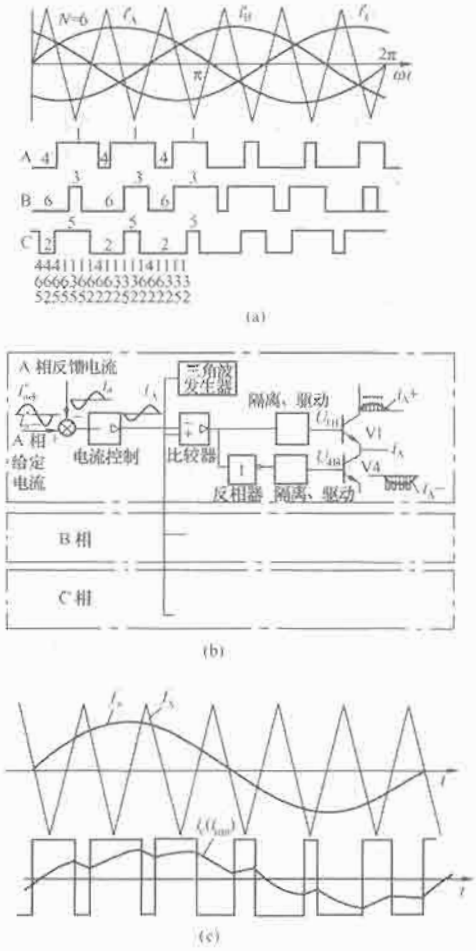


图 5.7-5 三相逆变器基本工作原理
（a）波形图；（b）原理框图；
（c）SPWM 电压和电流波形

将幅值为 A_Δ、频率为 f_Δ 的三角载波信号同时与幅值为 A_s、频率为 f_s 的三相正弦指令信号（依次相位差 120°）通过三个高速电压比较器比较（也称调制），每一比较器的输出是一串在 $T_s(=1/f_s)$ 周期内脉冲宽度呈正弦分布的脉冲列。其中第 n 个脉冲的宽度可以表示为

$$t_\delta(n,n+1) \approx \frac{T_s}{2N}\left[1+K\sin\left(\frac{4n+3}{2N}\pi\right)\right] \tag{5.7-7}$$

式中，N 为频率比，$N=f_\Delta/f_s$；K 为调制系数，$K=A_s/A_\Delta$。

再用每一路脉冲列中每个脉冲的高、低电平信号分别去控制三相逆变器中同一相上、下两个功率开关管［例如，图 5.7-5（a）中 A 相脉冲列中的 1、4 分别对应图 5.7-4 中的 V1、V4 管］的基极，使之交替导通。结果，逆变器输出的频率为 f_s 的三相交流电压或电流，如图 5.7-5（c）所示。

如果 f_Δ 不变，而仅仅改变 f_s，由图可知，逆变器输出的三相交流电的频率也相应随之改变。如果仅改变三相正弦指令信号的幅值，输出的基波幅值也随之改变。逆变器的这种工作原理称之为正弦脉冲宽度调制（SPWM）工作原理。

该逆变器，有着灵活的控制功能和控制方法：

1）如果改变三相正弦指令信号的相序，输出三相交流电压或电流的相序也随之改变，因此很容易改变伺服电动机的转向。

2）可采用电压控制方式，也可以采用电流控制方式。如果图 5.7-5（a）中的指令信号代表电流并以电流构成反馈系统，就成为电流控制方式。如果指令信号代表电压，就成为电压控制方式。

3）SPWM 工作原理的主要特征是：要有一个三角波发生器和一个快速电压比较器。由于数字信号处理器（DSP）技术的发展，无论是三角波发生器还是电压比较器，均易通过软件来实现，因而也出现各种数字控制方法。DSP 内部集成了 PWM 发生器，可方便地应用于各种伺服电动机控制系统中。基于对电动机磁链跟踪控制原理出现的“电压空间矢量脉冲宽度调制（SVPWM）”方法，对逆变器的控制而言亦完全不同于 SPWM 的概念，这种方法是从电动机的角度出发，其目的使电动机产生圆形磁场，被应用于正弦波永磁无刷电动机和感应电动机的控制中。

采用 SPWM 工作原理来控制逆变器的 6 个功率开关管，具有以下特点：

1）最低次谐波频率高，因而仅靠电动机的绕组本身的电感，就足以使电流成为相当光滑的正弦波。适当提高载波频率，可以起到减少电流脉动的效果，从而提高了运行的平稳性。

2）基波分量幅值与调制系数成正比关系。因此调节代表指令信号的正弦波幅值即可调节基波幅值的大小。

3）逆变器本身损耗小。它包括功率开关管饱和导通损耗和开关损耗。功率开关管饱和压降所产生的功率损耗与工作频率无关，而开关损耗则与工作频率近似成比例。

2.2　逆变器的工作频率

（1）逆变器的最低开关工作频率

逆变器的开关工作频率不宜过高。当伺服电动机一旦确定后，开关工作频率也不宜过低，否则会引起过电流，无法正常起动。

电动机瞬时最大冲击电流是在第一个最宽的脉冲电压加入使电动机起动的瞬间。设电动机的绕组的等效线电感为 L_1，等效线电阻为 R_1，施加的脉冲电压幅值为 U_d，功率开关管限定的冲击电流幅值为 I_P。考虑到电动机尚未起动运行，负载可看成是 $R-L$ 负载。则由 SPWM 工作特点，绕组中电流 i 可表示为

$$i = I_{10}(1 - e^{-t/\tau})$$

式中，$\tau = \dfrac{L_1}{R_1}$；$I_{10} = \dfrac{U_d}{R_1}$。

显然，冲击电流 I_P 应满足

$$I_{10}(1 - e^{-t_\delta/\tau}) \leqslant I_P$$

式中，t_δ 表示脉冲宽度。因此，

$$t_\delta \leqslant -\tau \ln \frac{I_{10} - I_P}{I_{10}} \tag{5.7-8}$$

式（5.7-8）意味着，采用 SPWM 工作方式时，载波频率（即开关工作频率）f_Δ 应满足

$$f_\Delta \geqslant 1/t_\delta \tag{5.7-9}$$

（2）逆变器的最高开关工作频率

当逆变器的功率开关管确定后，功率开关管的最高开关工作频率，根据前述将为允许的损耗所限制。但从限制电流或转矩的脉动来看，开关工作频率越高越好。实际上，开关工作频率过高，电流或转矩的脉动虽可减少，但可能达不到要求的电流幅值，同时还会引起更大的电磁噪声。因此，最高开关工作频率只要能满足要求的电流脉动即可。

根据前述结论，调制系数 K 越小，谐波幅值越大。特别是 $K=0$ 时，全部脉冲都是占空比为 50% 的脉冲。此时，第一个幅值最高的谐波分量幅值将达到 $1.27U_d$，其电流波形如图 5.7-6 所示。

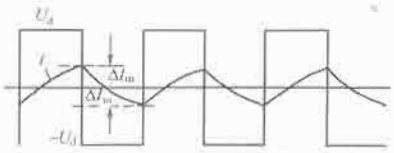


图 5.7-6　$K=0$ 时电流波形

此时，电动机将处于空载微振状态。在此条件下，按前述同样的分析方法，可推得允许的电流波动幅值 ΔI_m 与 f_Δ 的关系为

$$f_\Delta \approx 0.5\left[-\tau \ln\left(1 - \frac{2\Delta I_m}{I_{10}}\right)\right]^{-1} \tag{5.7-10}$$

式中，τ、I_{10} 的意义同前。

一般情况下，如果逆变器使用双极型功率晶体管，三角波频率可在 1～3kHz；如果使用 MOSFET，则选择 20kHz 以上；如果使用 IGBT，则选择 5～20kHz。为解决噪声可使 IGBT 开关频率在 10～20kHz。

2.3　泵升电压和死区

图 5.7-4 所示电压型三相逆变器的直流电源通常由交流电网经不可控的二极管整流器产生，并采用大电容 C 滤波，以获得恒定的直流电压 U_d。由于电容量较大，突加电源时相当于短路，势必产生很大的充电电流，容易损坏整流二极管。为了限制充电电流，在整流器和滤波电容之间串入限流电阻 R_a（或电抗），合上电源，延时后用开关将 R_a 短路，以免在运行中造成附加损耗。

滤波电容器用作滤波外，还有当电动机制动时吸收运行系统动能的作用。由于直流电源靠二极管整流器供电，不可能回馈电能，电动机制动时只好对滤波电容充电，这将使电容两端电压升高，称作“泵升（生）电压”。储能的增加量基本上等于运动系统在制动时释放的全部动能。应按制动储能要求选择电容量。电力电子器件的耐压限制着最高泵升电压，因此电容量就不可能很小，一般几千瓦的调速系统所需的电容量达到数千微法。在大电容量或负载有较大惯量的系统中，不可能只靠电容器来限制泵升电压，这时可以采用图 5.7-4 中的制动电阻 R_c 来消耗掉部分动能。R_c 的分流电路靠开关器件 VC 在泵升电压达到允许数值时接通。

在伺服系统中，逆变器中的功率开关管并不是理想的开关，存在导通的延时和关断的延时。为了保证逆变电路的安全工作，必须在同一相上、下两个桥臂功率开关管器件的通断信号之间设置一段死区时间（或称时滞），即在上（下）桥臂功率开关管得到关断信号后，要留出一定时间后才允许给下（上）桥臂功率开关管送入导通信号，以防止其中一个功率开关管尚未完全关断时，另一个功率开关管已经导通，而导致上、下两桥臂功率开关管同时导通，产生逆变器直流侧被短路的事故。死区时间的长短因功率开关管而异，一般对 IGBT 及智能功率模块（IPM）为 2～5μs。死区时间的存在显然会使逆变器不能完全精确地复现 PWM 控制信号的理想波形，或产生更多的谐波，或使电流、磁链跟踪性能变差，总之，会影响伺服系统的运行性能。改善死区的影响是采取对死区的补偿。

2.4 智能功率模块

随着集成电路制造技术的进步，人们把一部分控制电路功能和功率开关管集成在一个模块中，体积更加小巧、灵活，这就是所谓的智能功率模块（IPM）。它能缩短产品开发时间，简化开发步骤，将主要精力用于各种新型控制算法的研究和设计。IPM 已被广泛用于伺服系统中。

不同于一般功率模块，这种新型电力电子器件模块不仅把功率开关管和驱动电路集成在一起，而且还内藏有多种故障检测电路，并可将检测信号送到 DSP 中作中断处理。它由高速低功耗的管芯和优化的门极驱动电路及快速保护电路构成。即使发生负载事故或使用不当，也可以使 IPM 自身不受损坏。IPM 一般使用 IGBT 作为功率开关管，并内藏电流传感器及驱动电路的集成结构。以其高可靠性、使用方便，尤其适合于驱动器功率变换电路，是一种非常理想的电力电子器件模块。使用时只需用少量连线，提供控制部分的电源，输入相应开关量控制信号即可，提高了系统抗干扰能力和可靠性。采用含制动电路的 IPM 制作的逆变器框图如图 5.7-7 所示。

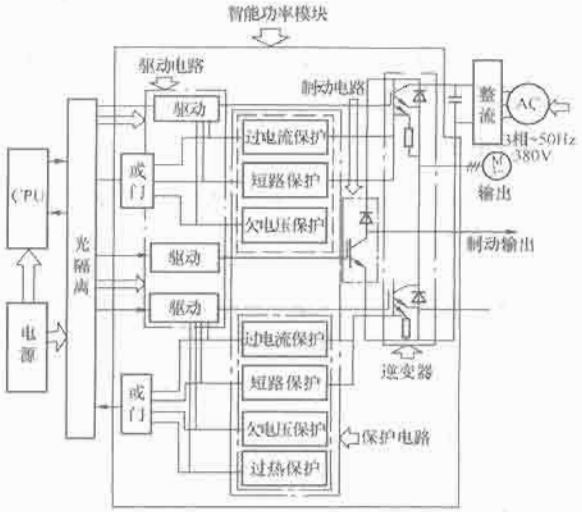


图 5.7-7 采用 IPM 制作的逆变器框图

IPM 的主要特点有：①开关速度快。IPM 内的 IGBT 芯片都选用高速型，而且驱动电路紧靠 IGBT 芯片，驱动延时小，损耗小。②低功耗。IPM 内部的 IGBT 导通压降低，开关速度快。③快速的过电流保护。IPM 实时检测 IGBT 电流，当发生严重过载或直接短路时，IGBT 将被软关断，同时送出一个故障信号。④过热保护。在靠近 IGBT 的绝缘基板上安装一个温度传感器，当基板过热时，IPM 内部控制电路将截止栅极驱动，不响应输入控制信号。⑤桥臂对管互锁。在串联的桥臂上，上下桥臂的驱动信号互锁，有效防止上下臂同时导通。⑥抗干扰能力强。优化的栅极驱动与 IGBT集成、布局合理，无外部驱动线。⑦驱动电源电压欠电压保护。当低于栅极驱动电源（一般为 15V）就会造成驱动能力不够，增加损坏的可能性。IPM 自动检测驱动电源，当低于一定值超过 10μs 时，将截止驱动信号。⑧IPM 内藏相关的外围电路，大大减少元器件数目，体积小，缩短开发时间。

3 控制技术

3.1 数字信号处理器

将实时处理能力和控制器外设集于一身的电动机控制专用高性能数字信号处理器（DSP）具有强大的数据处理能力，使得现代控制理论、模糊控制理论和神经网络理论等一些复杂算法数字化得以实现，控制策略得到优化，而且面向电动机控制的片内外设，使控制系统硬件结构得到简化，整个系统的性能得到显著提高。其单周期乘与加运算等指令，可以优化与简化反馈回路，从而有助于实现数字式电流闭环控制。直接产生高精度的 PWM 输出，抑制转矩纹波，减小电动机振动、延长电动机寿命。可以根据系统变化，进行实时动态调整各种参量。相对传统单片机而言，DSP 可以提供更快、更精确的控制。

TMS320LF2407A DSP 是 TMS320 系列中的典型芯片。基于 DSP 的全数字伺服系统，充分利用其丰富的周边接口，使系统的结构大为简化，具有良好的动、静态性能，且在外界参数大范围变化的情况下表现出很强的鲁棒性。

3.2 电流反馈及控制器

（1）电流反馈及处理

在伺服系统控制中，离不开电动机绕组电流的测量。此反馈信号对电动机的运行特性有着重要的影响。常用的电流测量方法有电阻片、霍尔传感器等。虽然电阻片能实现交直流及任意信号波形的测量，但由于测量反馈电路与主电路没有隔离及受温度变化时阻值改变的影响，一般用于低压及精度要求不高的场合。在伺服系统中，最好采用霍尔电流传感器，它是采用磁场平衡原理测量电流的，有电流或电压输出型，有开环和闭环方式。图 5.7-8 为霍尔电流传感器接线示意图。它具有以下优点：①可测量任意波形的电流及电压信号，频带宽，可测量从直流到 100kHz 的各种信号。②线性度好，测量区间宽，测量精度高。③响应速度快，延时和响应时间均小于 0.1μs。④过载能力强，使用安全。

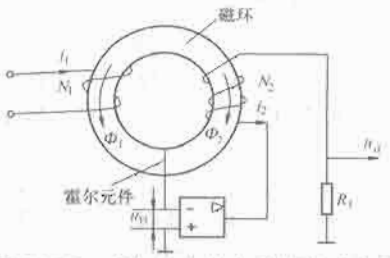


图 5.7-8 霍尔电流传感器接线示意图

一次侧被测电流多采用穿线式。将被测电动机绕组线电流 i_1 的导线（单匝或多匝）由传感器模块中间的孔中穿过即可得到测量电流 i_1，i_2 的额定值一般为 100mA，通过采样电阻 R_1，可将电流转化为电压信号。霍尔传感器使用时需要±15V的直流电源。当被测电流小时，可以通过增加一次侧穿线匝数提高测量精度。但同时需要注意，一次侧匝数增多后会降低响应速度。当一次侧接线由单匝增至两匝后，响应速度则由 0.1μs 增至 1μs。此外，一次侧穿线与模块耦合不紧也会降低响应速度，这主要是一次绕组漏磁场的影响。在实际使用中需要注意的是，因为被测量中含有大量谐波分量，如果响应速度太慢，将造成测量信号失真。采样电阻值选取要适当，不可过大或过小。如果 R_1 取值过小，则二次侧输出电压信号太小，不便在反馈控制电路中直接应用；如 R_1 取值过大，则限制了 i_2 的增大，有可能使其达不到补偿一次电流磁场所需要 i_2 的值，造成测量误差。具体使用时，可根据霍尔传感器模块的具体参数选取 R_1 值。

全数字伺服系统电流反馈测量电路如图 5.7-9 所示。采用变比为 1∶1000 霍尔元件检测主电路电流信号。在 DSP

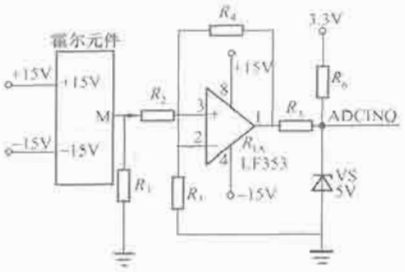


图 5.7-9　电流反馈电路

中，由于 A/D 输入信号范围为 0～3.3V，因此必须将霍尔元件输出的小电流信号首先变换为电压信号，再经放大滤波后进入 A/D 通道进行模/数转换，把其数字量适当定标，并叠加偏移量后，得到合适的数字信号。在 A/D 转换结束时，向 CPU 发中断请求，CPU 对该数字信号进行处理。如果每隔 50μs，DSP 对反馈电流进行采样，则可实现频率为 20kHz 的电流环调节。

R_1 为霍尔元件所允许的负载电阻，考虑到霍尔元件输出电流信号较弱，选用 LF353 构成同相放大器，同相放大器输入阻抗很高，可忽略 R_2 的影响。设定电动机最大起动电流为±15A，当 $i=15$A 时，对应 A/D 输入为 3.3V；当 $i=-15$A 时，对应 A/D 输入为 0V；$i=0$A 时，对应 A/D 输入为 1.65V，R_5、R_6 取值应相等，以便将具有正负极性的电流反馈信号转换为单极性信号送入 DSP。电流反馈的采样尽量避免在功率开关管的开通和关断瞬间进行。

（2）电流控制器

由图 5.7-1 可知，对电流的调节控制就是对转矩的调节控制。采用霍尔电流传感器对电枢电流进行无接触检测，测得的电流值作为反馈信号与电流的指令信号进行比较而得电流误差。由电流控制器按电流误差进行调节控制，使电流快速地跟随指令值变化，稳态时电流无静差。在动态起动过程中，电流环使电动机获得所允许的最大电流，电动机迅速起动。在堵转或过载时，电流控制器起自动限制电枢电流的作用。一般采用带饱和限幅的 PI 控制器，模拟电流控制器电路结构如图 5.7-10 所示。

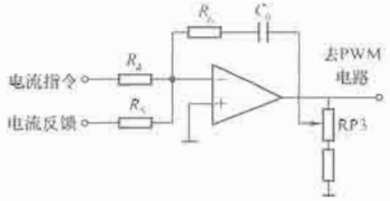


图 5.7-10　电流控制器电路

电流控制器与速度控制器一样，是由反馈电阻 R_6、电容 C_6 等组成的近似比例积分型放大器，它的传递函数与速度控制器的传递函数相同，不过传递函数中的时间常数应选得小一些。调整 RP3 可以调节电流控制器的反馈量，也就调节了增益。根据 R_6、C_6 来决定电流局部控制的截止频率。而 R_6、C_6 所决定的时间常数应大致与电机的电磁时间常数相等。因此一般情况下，电流环参数不允许用户调整，为提高电流环的动态跟随性能，在系统稳定的前提下，应尽可能提高电流控制器的比例放大系数，减小积分时间常数，以此减小反电动势对电流环调节性能的影响。在矢量控制技术中，同时还要进行电流的坐标变换（见本章矢量控制技术一节）。

3.3　速度反馈及控制器

（1）速度反馈及处理

以光电编码器为例，速度反馈常用的方法有 M 法、T 法和 M/T 法。M 法是在设定的采样周期内记录反馈脉冲的个数。反馈脉冲数与电动机的转速成正比，此方法使用方便。其缺点是在低速时，由于脉冲数少，精度较差。T 法是另外施加一个高频脉冲，并通过记录光电编码器反馈脉冲在其一个周期内所测得的高频脉冲个数来测量电动机转速。电动机转速与测量值成反比，电动机转速越高，测量值越小，故 T 法测速适合较低的转速；缺点为高速时精度较差。M/T 法综合了 M 法和 T 法的优点，既可在低速段可靠测速，也可在高速段具有较高的分辨能力。在实际应用中，可根据具体情况进行选择。

在 DSP 中的正交编码脉冲输入单元（QEP）能对脉冲前后沿进行 4 倍频，而无需添加任何硬件，并可根据两路脉冲的次序判别电机转向，简化了系统的硬件，图 5.7-11 所示为 QEP 电路单元框图。



图 5.7-11　QEP 电路和速度、位置反馈框图

光电编码器输出的 A、B 两路脉冲信号经整形后直接送入 QEP 单元的 QEP1、QEP2 引脚，经译码逻辑单元产生内部 4 倍频后的脉冲信号 CLK 和转向信号 DIR。对脉冲信号 CLK 的计数可由 T2 的 16 位计数器完成。计数器的计数方向由 DIR 信号决定。当 QEP1 输入超前时，计数器加计数；当 QEP2 输入超前时，计数器减计数。计数器的状态字中有专门的一位用于保存计数方向信息，这实际即为电动机的转向信息。

（2）速度控制器

由图 5.7-1 可知，在速度环中，速度指令信号与由测速元件取得的速度反馈信号进行比较而得速度误差值，由速度控制器按速度误差进行调节控制，其输出作为电流控制器的输入信号。使电动机转速快速跟随指令值变化。稳态时速度无静差，动态时限制转速超调。同时，由于转速负反馈的作用，会大大减小负载变化对转速变化的影响。速度控制器一般也采用带饱和限幅的 PI 控制器。模拟速度控制器电路结构如图 5.7-12 所示。

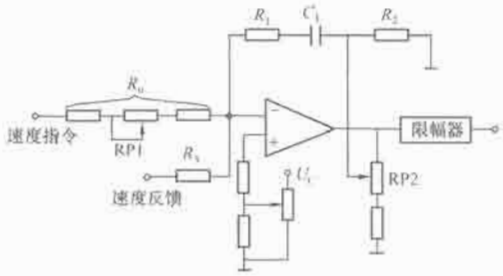


图 5.7-12　速度控制器电路

运算放大器由反馈阻抗 R_1、C_1 和输入电阻 R_0 等元件组成近似比例积分型放大器，其传递函数为

$$W_s(s)=K_p+\frac{1}{\tau s}=\frac{K_p\tau s+1}{\tau s} \qquad (5.7\text{-}11)$$

式中，K_p 为 PI 控制器比例部分的放大系数，$K_p=R_1/R_0$；τ 为 PI 控制器的积分时间常数，$\tau=R_0C_1$。

若令 $\tau_1=K_p\tau$，则

$$W_s(s)=\frac{\tau_1 s+1}{\tau s}=K_p\frac{\tau_1 s+1}{\tau_1 s} \tag{5.7-12}$$

式中，τ_1 为 PI 控制器的超前时间常数，$\tau_1=K_p\tau=\frac{R_1}{R_0}R_0C_1=R_1C_1$。

有时，为避免放大器长期工作时的零点漂移，特将其放大系数降低一些，在 R_1C_1 两端或 C_1 两端再并接一个阻值较大的电阻 R_2，这样就形成了近似的 PI 控制器，或称为准 PI 控制器。在这种情况下，控制器的稳态放大系数为

$$K_p=\frac{R_2}{R_0}\text{ 或 }K_p=\frac{R_1+R_2}{R_0} \tag{5.7-13}$$

这样，系统就成为一个近似的无差调速系统。当然，在动态过程中，基本上还是按 PI 控制规律工作的。

输入端的可调电位器 RP1 用来调整速度指令和速度反馈之间的相对大小，适当调整该电位器，可以抑制速度超调量。当电动机加上负载时，如果改变电位器 RP2 使反馈量增加，放大器的增益变小，要获得同样的输出，在放大器的输入端就必然存在较大的偏差，这就意味着速度下降较大。如果调整 RP2 使放大器反馈量变小，其增益必然增加，则速度下降较小。如果负载去掉后，最好调整 RP2 使放大器反馈量为零，反馈量为零即意味着放大器的增益将变得很大，速度降落当然很小，因为此时没有负载施于电动机轴上。这种可变增益的控制方法在 DSP 中，用软件容易实现。

实际上，调整电位器 RP1、RP2 都是用来改变放大器的增益，根据 R_1、C_1 就可以决定速度控制电路的截止频率。

放大器的输出为下一个控制环节的电流基准，限制这个基准信号就可以把电动机的绕组电流限制在一个特定的电流值，因此在放大器的输出端设置一个限幅电路，也可以设置在放大器的输入与输出之间。

3.4 位置反馈及控制器

(1) 位置反馈及处理

在伺服系统中，一般位置反馈信号从安装于伺服电动机端部的位置传感器获得。为了使系统具有高精度位置控制性能，位置检测元件本身必须是高精度的。通常此类传感器一般有光电编码器、旋转变压器等。

在 DSP 中，位置反馈的实现具有与速度反馈相同的 QEP 单元，如图 5.7-11 所示。对光电编码器进行四倍频和正反向自动计数，该数值在规定的字节长度内，与电动机的转角位置一一对应。同时，光电编码器还输出 U、V 和 W 三路脉冲信号。这三路信号彼此相差 120°，且 1r 内的周期数与电动机的极对数一致。此信号主要用来检测永磁无刷电动机上电时转子磁极的初始位置，一旦初始位置确定，A、B 信号计数指明转子磁极的细节位置。旋转变压器本身具有结构坚固耐用、抗冲击、可通过控制电路较容易改变分辨率等特点，常用在军事等领域。旋转变压器本身输出的位置信息是连续变化的模拟量，必须经过高频数字化处理后才能与 DSP 接口，其信号处理电路比较复杂，通常采用一种称为 R/D 转换器的电路进行数字量转化，供系统使用，系统也必须同时向旋转变压器提供一路励磁信号。但是 R/D 输出分辨率与跟踪速度成反比，电动机在最高转速下的运行必然带来 R/D 输出分辨率下降，灵敏度降低。伺服电动机的转速一般都比较高，有的甚至在 20000r/min 以上，这就必须通过电路设计与参数的合理匹配来满足采样信号灵敏度与稳定性的协调一致，以达到位置信号跟踪的要求。

(2) 位置控制器

由图 5.7-1 可知，按照位置控制的要求，位置反馈信号必须跟随位置指令信号的变化而变化。位置控制器按设定的采样周期不断地将数字位置指令值与位置反馈值进行比较，求出位置偏差值，再根据位置环的控制规律进行调节，使其在最短时间内达到零。位置控制器保证系统对位置指令信号的快速跟踪，实现系统的无振荡、无超调的精确定位。位置控制器常采用比例加前馈控制器。位置控制构成大体有两类：一类是模拟位置控制，它的位置控制精度不是很高；另一类是最常用的数字位置控制。

3.5 数字 PI 控制器

(1) 模拟 PI 控制器的数字化

控制器又称为调节器，在全数字系统中，当采样频率足够高时，可以先按模拟系统的设计方法设计调节器，然后离散化，就可以得到数字控制器算法，这就是模拟控制器的数字化。

模拟控制器时域关系为

$$u(t)=K_Pe(t)+\frac{1}{\tau}\int e(t)dt=K_Pe(t)+K_I\int e(t)dt$$

式中，K_P 为比例系数；K_I 为积分系数；$e(t)$ 为偏差；τ 为积分时间常数。

将上式离散化成差分方程，第 k 拍输出

$$u(k)=K_Pe(k)+K_I\sum_{i=1}^{k}e(i) \tag{5.7-14}$$

数字式 PI 调节器有位置式和增量式两种算法，式 (5.7-14) 表述的为位置式算法，$u(k)$ 为第 k 拍的输出值。可以看出，比例部分与当前的偏差有关，而积分部分则是系统过去所有偏差的累积。位置式 PI 控制器的结构清晰，P 和 I 两部分作用分明，参数调整简单明了。

在控制系统中，为了安全起见，常需对调节器的输出实行限幅。位置式算法必须同时设积分限幅和输出限幅，缺一不可。若没有积分限幅，当反馈大于给定，使调节器退出饱和时，积分项可能仍很大，将产生较大的退饱和超调。

(2) 改进的数字 PI 算法

PI 控制器的参数直接影响着系统的性能指标。在高性能的调速系统中，有时仅仅靠调整 PI 参数难以同时满足各项静、动态性能指标。而数字控制系统具有很强的逻辑判断和数值运算能力，充分利用这些能力，可以衍生出多种改进的 PI 算法。

1) 积分分离法。在 PI 控制器中，比例部分能快速响应控制作用，而积分部分是偏差的积累，能最终消除稳态误差。在模拟 PI 控制器中，只要有偏差存在，P 和 I 就同时起作用。因此，在满足快速调节功能的同时，会不可避免地带来过大的退饱和超调，严重时将导致系统的振荡。

在数字控制系统中，很容易把 P 和 I 分开。当偏差大时，只让比例部分起作用，以快速减少偏差；当偏差降低到一定程度 δ 后，再将积分作用投入，即可最终消除稳态偏差，又能避免较大的退饱和超调。这就是积分分离法的基本思想，积分分离法的表达式为

$$u(k)=K_Pe(k)+C_IK_I\sum_{i=1}^{k}e(i)$$

式中

$$C_I=\begin{cases}1, & |e(i)|\leqslant\delta\\ 0, & |e(i)|>\delta\end{cases}\quad(\delta\text{ 为常数})$$

积分分离法能有效抑制振荡或减少超调，常用于速度控

制器。

2）分段 PI 算法。在双闭环调速系统中，电流控制器功能之一是克服反电动势的扰动。在速度变化过程中，必须依靠积分作用抑制反电动势，使电枢电流快速跟随给定值，以保证最大的起动和制动电流。因此，在转速偏差大时，电流控制器应选用较大的 K_P和 K_I参数，使实际电流能迅速跟随给定值。在转速偏差较小时，过大的 K_P和 K_I又将导致输出电流的振荡，增加速度控制器的负担，严重时还将导致转速的振荡。分段 PI 算法可以解决动态跟随和稳定性的矛盾。分段 PI 算法的表达式与式（5.7-14）完全一样，但有两套或多套 PI 参数，可根据偏差的大小，在多套参数间进行切换。

3）积分量化误差的消除。积分部分是偏差的积累，当采样周期较小，且偏差也较小时，当前的积分项可能很小，在运算时被 DSP 整量化而舍掉，从而产生积分量化误差。扩大运算变量的字长，提高计算精度和分辨率，都能有效地减小积分量化误差，但这会使存储空间和运算复杂程度成倍增加。为了解决这个矛盾，可以只增加积分项的有效字长，并将它分为整数与尾数两部分。整数与比例部分构成控制器输出，尾数保留下来作为下一拍累加的基数值。这样的好处是，可以减小积分量化误差，而存储空间和运算复杂程度增加得并不多。

3.6　数字滤波技术

在电动机全数字闭环控制系统中，反馈值是通过对系统的输出量进行采样而得到的。它与给定值之差形成偏差信号，所以反馈值是决定偏差大小的重要数据。反馈值如果不能真实地反映系统的输出，控制系统就失去它的作用。

在实际中，对电动机输出的反馈值常混有干扰噪声。用混有干扰噪声的反馈值作为反馈信号，将引起系统误动作，在有微分控制环节的系统中还会引起系统振荡，因此危害极大。

干扰噪声可分为周期性和随机性两类。对周期性的工频和高频干扰，可以通过在电路中加入 *RC* 低通滤波器硬件来加以抑制；但对于低频周期性干扰和随机性干扰，硬件就无能为力了，用数字滤波可以解决这些问题。同时在伺服系统中，前向控制通道中也要加入速度给定滤波、电流给定滤波及陷波滤波。所谓数字滤波（器），就是通过一定的软件计算或判断来减少干扰在有用信号中的比重，达到减弱或消除干扰的目的。它与模拟滤波相比有如下优点：数字滤波是用程序实现的，不需要增加硬件投入，因而成本低，可靠性高，稳定性好，不存在各回路之间的阻抗匹配问题；可以对频率很低的信号实现滤波；在设计和调试数字滤波器的过程中，可以根据不同的干扰情况，随时修改滤波程序和滤波方法，具有很强的灵活性。其主要方法有算术平均值法、移动平均滤波法、防脉冲干扰平均值法、数字低通滤波法等。各种数字滤波器各有优缺点。在电机控制中，要求动态响应速度快，因此在选用数字滤波时，除了考虑滤波效果外，还要考虑滤波器的滤波速度。在实际应用中，有时将几种滤波器组合在一起使用。

3.7　PWM 生成和功率变换驱动接口

DSP 的 PWM 发生电路可产生 6 路具有可编程死区和可变输出极性的 PWM 信号。PWM 输出及功率变换驱动电路框图如图 5.7-13 所示。

当 T1 计数值与全比较单元的比较单元值相同时，产生的状态匹配信号进入波形发生单元。在系统中，使用非对称或对称 PWM 波发生器，由其产生的 PWM 信号进入死区发生单元，死区宽度为 0～16μs 可调。考虑到所用功率开关器件的开通和关断时间，一般可设定 PWM 波的死区时间为 2～6μs。输出逻辑控制单元控制 PWM 信号的极性，可设置 PWM 信号为强制高电平、强制低电平、激活高电平、激活低电平 4 种状态。图 5.7-13 为全比较器 1 相对应的 PWM1、PWM2 两路信号作为单相 H 桥功率变换电路的驱动输入。



图 5.7-13　PWM 输出及功率变换驱动框图

由变压器抽头引出的电压经整流、滤波、稳压后，产生相互独立的 15V 直流电源给驱动单元 TLP250（高速光电耦合器）供电，TLP250 将 DSP 输出的 0～3.3V 的 PWM 信号转换为 0～15V 的驱动信号。该驱动信号完全浮地，与主电路电源电压相隔离，且 TLP250 本身的隔离作用又将 DSP 与控制电源和主电路电源相隔离，使得系统工作安全可靠。

3.8　保护和辅助功能

为保证系统中功率变换电路及电机安全可靠地工作，伺服系统一般具备过电压、过电流、过热、超速、反馈断线、断相等保护功能，且进行锁存。DSP 为此提供了 PDPINT 输入信号，实现伺服系统的各种保护功能。具体实现电路如图 5.7-14 所示。

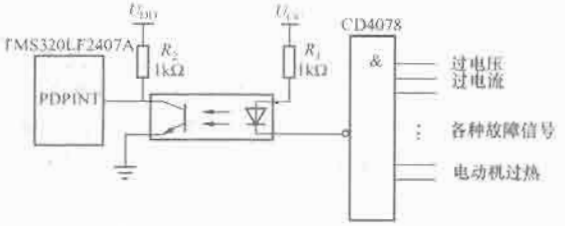


图 5.7-14　利用 PDPINT 实现保护功能框图

各种故障信号由 CD4078 综合后，经光隔离输入到 PDPINT 引脚。有任何故障状态出现时，CD4078 输出低电平，PDPINT 引脚也被拉为低电平，此时 DSP 内定时器立即停止计数，所有 PWM 输出引脚全部呈高阻状态，同时产生中断信号，通知 CPU 有异常情况发生。整个过程不需要程序干预，全部自动完成，这对实现各种故障状态的快速处理非常有用。

另外，系统中用串行通信接口（SCI）完成与上位机的通信功能，采用 RS-232 通信，波特率可达 19.2kbit/s 或采用 CAN 总线等组成网络。通过上位机可以给定位置、速度、转矩指令及其他参数。同时控制过程中电动机的速度、电流、位置等参数也可以实时地送上位机显示；串行外围设备接口（SPI）完成串行驱动数码管显示的功能，通过数字 I/O 扩展的键盘也可以设定位置、速度、转矩给定量及其他参数，由数码管显示；程序可直接固化在片内的存储器中，并由看门狗和实时中断定时器完成程序走飞后的系统复位。

3.9　专用集成电路

目前，直流伺服电动机、永磁无刷电动机、步进电动机、感应电动机都有专用集成电路控制芯片。

近年来，伺服系统得到迅速推广应用的主要原因之一是

专用控制电路芯片和功率集成电路芯片的出现，它把控制器硬件结构及接口和控制算法集于一体，形成各种电机控制专用集成电路。现在，正广泛地在电机控制中获得应用，赋予更多的功能，减轻设计任务，使电机控制更为有效。随着电机应用技术越来越复杂，系统设计者正在通过利用电机控制集成电路寻求工作的简化。电机控制集成化的一个理由是使用者容易获得最佳的硬件一软件解决方案，人们可用最小的开发时间，就能将其最终产品在市场上销售。事实上，许多伺服电动机和步进电动机在消费、商业和工业的应用市场竞争中，以更短时间推向市场这个因素变得更具有决定性。电动机控制集成电路市场主要包括工业自动化、计算机与外围设备、汽车、家用电器、消费类产品、医学设备、军事/航空和商用的电动机驱动控制。工业自动化仍是最普遍的应用市场，用于家用电器和消费产品部分将会增加，更多的焦点放置在功率开关管和功率变换上。目前用于电机控制的集成电路大致可以分为三大类：电机控制专用集成电路以及专门为电机控制设计的微控制器（MCU）和数字信号处理器（DSP）。电机控制专用集成电路的出现对电机控制的影响是深远的，它大大推动了电机控制行业的发展，市场前景十分广阔。但是，随着技术的进步，特别是数字化趋势流行的今天，人们不会满足于停留在模拟数字混合的时代。针对电机控制应用的 MCU 和 DSP 芯片替换了曾经充满整个电路板的许多元器件。

随着技术的发展，会有功能更强、性能更好、适合于各种电机的专用集成电路出现。

3.10 新型的控制策略

（1）直接转矩控制

1985 年，Depenbrock 教授提出感应电动机直接转矩控制方法。该方法在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型，在近似圆形旋转磁场的条件下强调对电动机的转矩进行直接控制，省掉了矢量坐标变换等复杂的计算。其磁场定向应用的是定子磁链，只需知道定子电阻就可以把它观测出来，相对矢量控制更不易受电动机参数变化的影响。近年来，直接转矩控制方式被移植到伺服电动机的控制中，其控制规律和关键技术正逐渐被人们了解、掌握。

（2）非线性控制

交流电动机是一个强耦合、非线性、多变量系统。非线性控制通过非线性状态反馈和非线性变换，实现系统的动态解耦和全局线性化，将非线性、多变量、强耦合的交流电动机系统分解为两个独立的线性单变量系统。其中转子磁链子系统由两个惯性环节组成，转速子系统由一个积分环节和一个惯性环节组成。两个子系统的调节按线性控制理论分别设计，以使系统达到预期的性能指标。

但是，非线性系统反馈线性化的基础是已知参数的电动机数学模型和系统的精确测量与观测，而电动机在运行中参数受各种因素的影响会发生变化，磁链观测的准确性也很难论证，这些都会影响系统的鲁棒性，甚至造成系统性能恶化，目前这种控制方法仍有待进一步完善。

（3）自适应控制

自适应控制能在系统运行过程中不断提取有关模型的信息，使模型逐渐完善，所以是克服参数变化影响的有力手段。应用于伺服电动机控制的自适应方法有模型参考自适应控制、参数辨识自校正控制以及新发展的各种非线性自适应控制。所有这些方法存在的问题是：①数学模型和运算烦琐，使控制系统复杂化。②辨识和校正都需要一个过程，所以对一些参数变化较快的系统，就会因来不及校正而难以产生很好的效果。

（4）滑模变结构控制

滑模变结构控制是变结构控制的一种控制策略，它与常规控制的根本区别在于控制的不连续性，即它具有一种使系统“结构”随时变化的开关特性。其主要特点是，根据被调量的偏差及其导数，有目的地使系统沿设计好的“滑动模态”轨迹运动。这种滑动模态是可以设计的，且与系统的参数及扰动无关，因而使系统具有很强的鲁棒性。另外，滑模变结构控制不需要任何在线辨识，所以很容易实现。但滑模变结构控制本质上的不连续开关特性使系统存在“抖振”问题，主要原因是：①对于实际的滑模变结构系统，其控制力总是受到限制的，从而使系统的加速度有限。②系统的惯性、切换开关的时间空间滞后及状态检测的误差，特别对于计算机的采样系统，当采样时间较长时，形成“准滑模”等。所以在实际系统中抖振必定存在且无法完全消除，这就限制了它的应用。但对于位置控制，因为电动机自身的惯量起到了一个滤波作用，其抖振影响较小。可以通过一些措施加以改善，如提高系统电流采样频率，增大 PWM 载波频率，以及减小系统反馈信号处理的延迟时间。

（5）智能控制

近代智能控制包含专家系统、模糊控制、神经网络控制、遗传算法等，其突出的特点是，控制算法不依赖或不完全依赖于对象模型，系统具有较强的鲁棒性。

智能控制理论是伺服控制发展里程中的一个崭新阶段，与传统的经典、现代控制方法相比，具有一系列独到之处。首先，它突破了传统控制理论中必须基于数学模型的框架，不依赖或不完全依赖于控制对象的数学模型，只按实际效果进行控制。其次，继承了人脑思维的非线性，智能控制器也具有非线性特征；同时，利用计算机控制的便利，可以根据当前状态切换控制器的结构，用变结构的方法改善系统的性能。在复杂系统中，智能控制还具有分层信息处理和决策的功能。利用智能控制的非线性、变结构、自寻优等各种功能来克服伺服系统变参数与非线性等不利因素，可以提高系统的鲁棒性。目前智能控制在永磁无刷电动机伺服系统应用中较为成熟的当属模糊控制和神经网络控制。其中模糊控制是利用模糊集合来刻画人们日常所使用的概念中的模糊性，使控制器能更逼真地模仿熟练操作人员和专家的控制经验与方法。它包括精确量的模糊化、模糊推理、模糊判决三部分。一些文献表明，模糊控制系统只有与其他控制方法相结合，才能获得优良的性能。神经网络控制在正弦波永磁无刷电动机伺服系统中的应用主要有下面几个方面：①代替传统的 PID 控制。②由于实际的矢量控制效果对传动系统参数很敏感，将神经网络用于电动机参数的在线辨识、跟踪，并对磁通及转速控制器进行自适应调整。③电动机矢量控制需要知道转子磁通的瞬时幅值与位置，无速度传感器矢量控制还需要知道转速，神经网络被用来精确估计转子磁通幅值、位置及转速。④结合模型参考自适应控制，将神经网络控制器用于自适应速度控制器。

4 永磁无刷电动机系统

由本篇第 6 章可知：永磁无刷电动机的控制模式分为两大类：方波驱动和正弦波驱动。方波驱动时，其驱动电流为近似矩形波；正弦波驱动时，其驱动电流为正弦波。

4.1 方波驱动永磁无刷电动机系统

在以方波驱动的永磁无刷电动机控制中，大多只进行速

度闭环控制，在要求具有动态性能时，增加电流闭环。在整个驱动系统中，其速度环、电流环的调节和处理具有通用性，关键是 PWM 的输出和换相逻辑的合成，要能保证正确的绕组换相。其速度反馈测量和磁极位置传感只采用有限的霍尔信号，因此性能不如正弦波驱动的永磁无刷电动机。以下所述的永磁无刷电动机均指方波驱动。

4.1.1　速度闭环控制

对永磁无刷电动机的速度调节范围和速度控制精度有较高要求时，应当采用速度闭环的控制结构，如图 5.7-15 所示。转速的控制由速度给定决定，正反转的控制由方向给定决定。

在永磁无刷电动机闭环调速系统中，速度控制器的输出信号，用作 PWM 的控制信号。速度给定始终为正，只有大小变化。一般将霍尔位置传感器的信号加以 6 倍频处理后，形成速度反馈信号。反馈信号始终为正，也只有大小变化。方向给定和霍尔位置传感器信号的组合形成换相逻辑控制。这种控制系统中，一般带有电流截止负反馈。

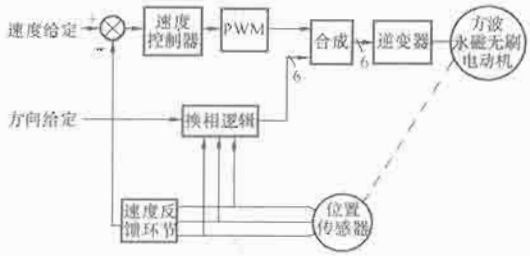


图 5.7-15　速度闭环的控制结构

4.1.2　速度电流双闭环控制

采用速度单闭环控制的无刷电动机控制系统可以提高电动机的速度控制精度，减小速度误差。如果对系统的动态性能要求较高，例如要求电动机快速起动、制动、突加负载时速度改变小、恢复快等，单闭环系统就无法满足要求了。这时，需要速度和电流的双闭环控制，使其具有伺服的性能。

与有刷直流电动机双闭环系统相比，无刷直流电动机双闭环系统中的电流环结构具有其特殊性，这里有三相电枢绕组，如采用二二导通方式，在不同的时刻，电动机的电流经过其中不同的两个绕组，根据这一特点，至少必须设置两路霍尔电流传感器。根据基尔霍夫电流定律，第三相的电流可由另外两相的电流值计算得到。电流传感器的安装位置，以及输出的波形如图 5.7-16 所示。

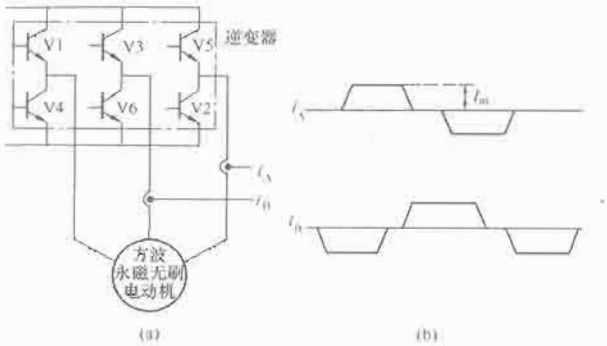


图 5.7-16　电流采样及波形

从图 5.7-16（b）可以看出，当管 V5 导通时，A 相电流 i_A 的方向为正；当管 V2 导通时，A 相电流 i_A 的方向为负；当管 V3 导通时，B 相电流 i_B 的方向为正；当管 V6 导通时，B 相电流 i_B 的方向为负。在这里，方波电流幅值 I_m 与电动机转矩成正比。

构成电流闭环的方式有多种，具有两个电流调节器的双闭环控制框图如图 5.7-17 所示。

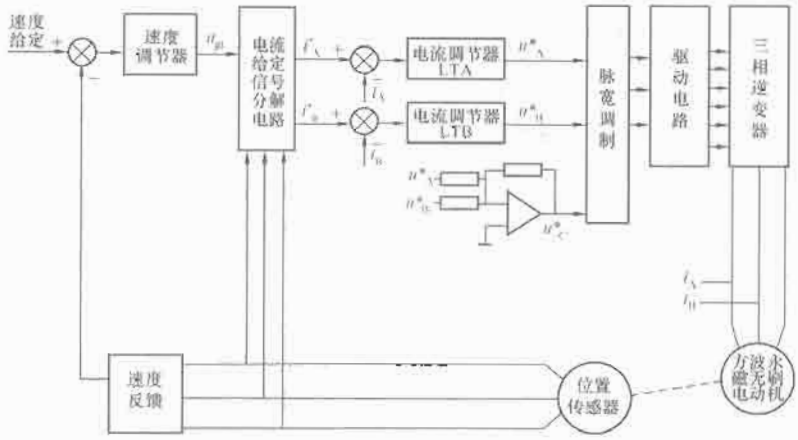


图 5.7-17　具有两个电流调节器的双闭环控制框图

采用两个电流调节器构成双闭环系统，需要对速度调节器的输出信号 u_{gi} 进行“分解”，使其能够成为 A 相和 B 相的电流给定信号。实现对 u_{gi} 的“分解”的电路如图 5.7-18 所示。对 u_{gi} “分解”，也就是 A 相电流的给定值 i_A^* 与 B 相电流给定值 i_B^*（是按相同的办法形成的），彼此互差 120°电角度。在这种控制方式下，电动机换向是与控制电流波形结合在一起来实现的，无需专门的方向控制信号，在图 5.7-18 中可以看出，当 u_{gi} 的极性反向以后，A 相和 B 相电流的给定值都会发生 180°相位移动，所以转矩的方向直接体现在 u_{gi} 的极性中。

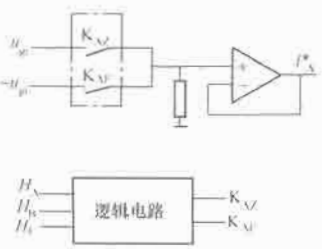


图 5.7-18　实现对 u_{gi} “分解”的电路

A 相和 B 相电流反馈信号 i_A 和 i_B 可以由电流传感器直接测得。A 相和 B 相电流调节器分别是 LTA、LTB，一般采用比例积分型，输出信号分别是 u_A^* 和 u_B^*。由反馈系统理论可知，u_A^* 和 u_B^* 具有电动机绕组相电压控制信号的性质，C 相绕组的相电压控制信号 u_C^* 可由下式得到

$$u_C^* = -(u_A^* + u_B^*)$$

u_A^*、u_B^*、u_C^* 和三角载波信号 U_t 进行比较，经过调制后的信号是三路 PWM 波，可以用其控制逆变器主电路，实现对电动机的驱动，如图 5.7-19 所示。

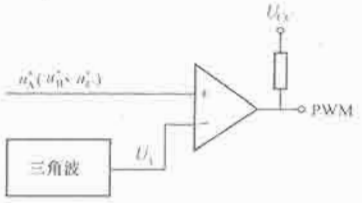


图 5.7-19 脉冲宽度调制

采用这种三角载波比较方式实现电流跟踪控制具有谐波分量固定、电流波动小的特点，可以在一个三角载波周期内实现电流的跟踪，即实现最短时间控制。三角载波频率的选择会影响电流控制的快慢，平均的控制延时等于半个三角波载波周期，在这一延时小于电动机机电时间常数的1/10时，可以忽略不计。

4.1.3 无位置传感器控制

无位置传感器的无刷直流电动机的转子位置是通过间接检测和评估的方法来获得的。获取转子位置的目的是为了换相，对于三相绕组的电动机，在一个电周期内要检测出 6 个反映转子位置的时刻，相邻两时刻相差 60°电角度。由本篇第 6 章可知，常用方法有反电动势法、续流二极管检测法、瞬时电压方程法等。无论采用何种方法，都只适合于电动机稳速运行。当电动机速度有波动时，所得的估计值误差较大。续流二极管检测法，通过对逆变器开关管施加特殊时序的斩波控制信号，使电动机绕组的续流电流沿着特定的回路流通。当断开相绕组的反电动势过零时，与断开相开关管并联的续流二极管中将流过续流电流，通过对该续流二极管导通与否的检测就可以确定出绕组反电动势的过零点，从而得到电动机的转子位置信号。这种检测方法实际检测的是绕组的反电动势，但是检测的灵敏度相对较高，在电动机额定转速的 2%以上有效，起动容易，调速比大；缺点是实现电路稍复杂一些。瞬时电压方程法，利用电动机各相瞬时电压和电流方程，实时计算电动机由静止到正常运转任一时刻转子的位置，控制电动机的运行。该方法不需专门的起动线路，电路简单，起动转矩大，但对电动机本体的数学模型依赖性大，当电动机参数因温度变化发生漂移时，容易造成建模误差，使控制精确性受到影响；另外，由于在线计算复杂，计算量很大，考虑到转子位置检测的实时性，必须采用具有快速运算能力的 DSP 和高速A/D转换器。

图 5.7-20 所示是采用反电动势法构成的无位置传感器无刷直流电动机控制系统，从电动机三相绕组的端点取出三相反电动势，经过过零检测和 30°移相，得到了换向控制信号，此信号经过功率放大，就可以用来驱动逆变器主电路开关管。

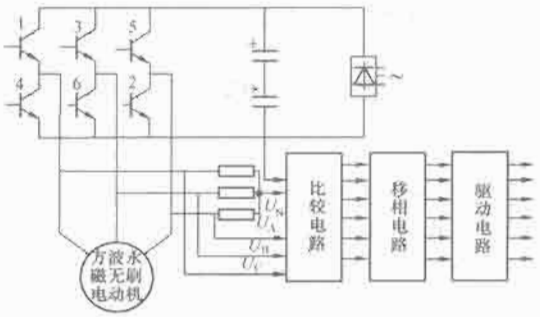


图 5.7-20 由反电动势法构成的无位置传感器无刷直流电动机控制系统

4.1.4 全数字方波驱动控制

（1）有位置传感器

在本例中无刷直流电动机只有一对磁极，电气角和机械角相等，采用三相星形联结，感应电动势波形为梯形。图 5.7-21 是用 DSP 实现三相无刷直流电动机调速的控制和驱动电路。三个位置间隔 120°分布的霍尔传感器 H1、H2、H3 经整形隔离电路后分别与 DSP 的三个捕捉引脚 CAP1、CAP2、CAP3 相连，通过产生捕捉中断来给出换相时刻，同时给出位置信息。由于电动机每次只有两相通电，其中一相正向通电，另一相反向通电，形成一个回路，因此每次只需控制一个电流。用电阻 R 作为廉价的电流传感器，将其安放在电源对地端，如需要与功率变换电路隔离可采用霍尔电流传感器。电流反馈输出经滤波放大电路连接到 DSP 的 ADC 输入端 ADCIN00，在每一个 PWM 周期都对电流进行一次采样，对速度（PWM 占空比）进行控制。DSP 通过 PWM1～PWM6 引脚经一个隔离和反相驱动电路连接到 6 个开关管，实现定频 PWM 和换相控制。速度反馈则是通过霍尔位置传感器输出的位置量，经过计算得到的。

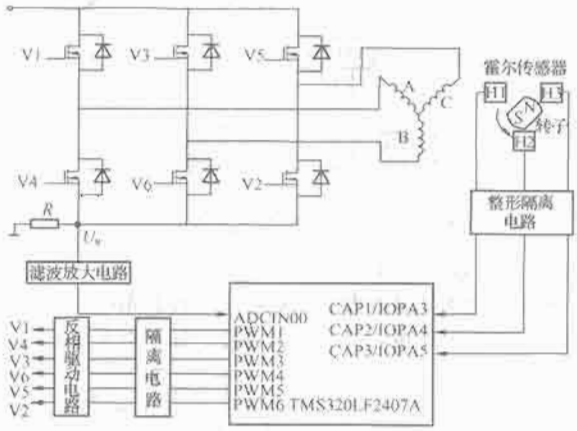


图 5.7-21 DSP 控制和驱动电路

1）电流的检测和计算。电流的检测是用分压电阻 R 来实现的。电阻值的选择可考虑当过电流发生时能输出最大电压，同时起到过电流检测的作用。每一个 PWM 周期对电流采样一次，如果 PWM 周期设为 50μs，则电流采样频率为 20kHz。

但是有一个问题必须要注意：在一个 PWM 周期中何时对电流进行采样？如果对开关管采用双极性 PWM 控制，在 PWM 周期的“关”期间，电流经过同一桥臂的另两个开关管的续流二极管到电源形成续流回路，在电阻 R 上有反向电流流过，产生负压降，所以在 PWM 周期的“关”期间不能采样电流。另外在 PWM 周期的“开”的瞬间，电流上升并不稳定，也不易采样。所以电流采样时刻应在 PWM 周期的“开”期间的中部，如图 5.7-22 所示（以对 V1、V6 开关管的控制为例）。它可以通过 DSP 定时器采用连续增减计数方式时周期匹配事件启动 A/D 转换来实现。

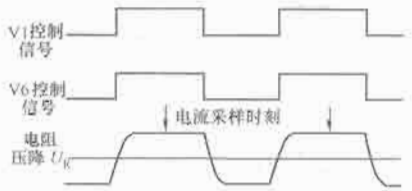


图 5.7-22 PWM 控制时电阻上的电压波形图

2）位置检测和速度计算。根据无刷电动机控制原理，为了保证得到恒定的最大转矩，就必须不断地对无刷电动机进行换相，减小转矩的波动。因此位置检测是非常重要的。位置检测不但用于换相控制，而且还用于产生速度反馈量。下面讨论如何通过位置信号进行换相控制，以及如何进行速度计算。

位置信号是通过 3 个霍尔传感器得到的。每一个霍尔传感器都会产生 180°脉宽的输出信号。3 个霍尔传感器的输出信号互差 120°相位差。这样在旋转 1 周中共有 6 个上升和下降沿，正好对应着 6 个换相时刻。通过将 DSP 设置为双沿触发捕捉中断功能，就可以获得这 6 个时刻。

但是只有换相时刻还不能正确换相，还需要知道应该哪一相需要换相。通过将 DSP 的捕捉口 CAP1～CAP3 设置为 I/O 口，并检测该口的电平状态，就可以知道哪一个霍尔传感器的什么沿触发的捕捉中断。将捕捉口的电平状态称为换相控制字，换相控制字与换相的对应关系见表 5.7-1，该表是根据霍尔传感器的输出信号和绕组电流关系得到的，如图 5.7-23 所示。在捕捉中断处理子程序中，根据换相控制字查表就能得到换相信息，实现正确换相。

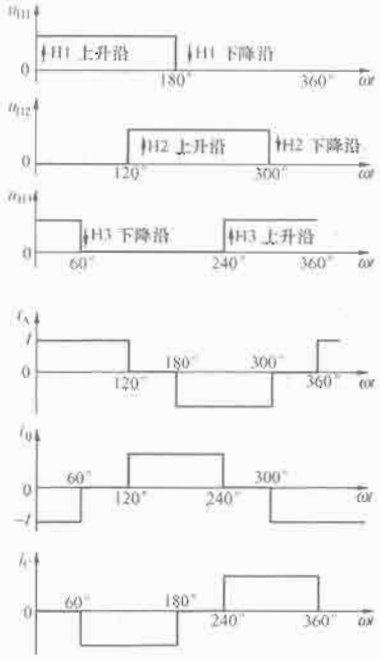


图 5.7-23　霍尔位置传感器输出波形与电流波形的对应关系

位置信号还可以用于产生速度反馈量。旋转一转中，转子每转过 60°机械角都有一次换相。这样，只要测得两次换相的时间间隔 Δt，就可以计算出两次换相间隔期间的平均角速度。本例中，每 62.5ms 进行一次速度调节，即 1250 个 PWM 周期（每个 PWM 周期 50μs）采样调节一次。

表 5.7-1　　换相控制字与换相的对应关系

换相控制字（电平状态）			触发中断时的沿状态	各开关管工作状态					
CAP3	CAP2	CAP1		V1	V4	V3	V6	V5	V2
1	0	1	H1 上升沿	PWM	OFF	OFF	PWM	OFF	OFF
0	0	1	H3 下降沿	PWM	OFF	OFF	OFF	OFF	PWM
0	1	1	H2 上升沿	OFF	OFF	PWM	OFF	OFF	PWM
0	1	0	H1 下降沿	OFF	PWM	PWM	OFF	OFF	OFF
1	1	0	H3 上升沿	OFF	PWM	OFF	OFF	PWM	OFF
1	0	0	H2 下降沿	OFF	OFF	OFF	PWM	PWM	OFF

无刷直流电动机在起动时也需要位置信号。通过 3 个霍尔传感器的输出来判断应该先给哪两相通电，并且给出一个不变的供电电流，直到第一次速度调节。

3）控制软件。采用图 5.7-21 所示的硬件电路。CPU 时钟频率为 20MHz，PWM 频率为 20kHz。通过定时器 1 周期匹配事件启动 A/D 转换，使每个 PWM 周期都对电流进行一次采样，并在 A/D 转换中断处理程序中对电流进行调节，来控制 PWM 输出。转子每转过 60°机械角都触发一次捕捉中断，进行换相操作和速度计算。图 5.7-24 是捕捉中断和 A/D 转换中断的程序框图。

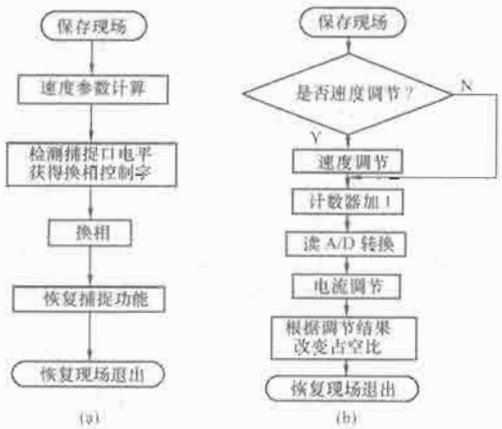


图 5.7-24　程序框图

（a）捕捉中断子程序框图；（b）A/D 中断子程序框图

（2）无位置传感器

只要测量出各相的相电压 u_{a0}、u_{b0}、u_{c0}，根据式（5.7-15）由 DSP 计算出 u_N，就可通过式（5.7-16）计算出任一断电相的感应电动势。通过判断感应电动势的符号变化，来确定过零点时刻，再将其延迟 30°，就可以获得 6 个换相信号。

$$u_N = \frac{1}{3}(u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}) \tag{5.7-15}$$

$$\left.\begin{aligned} e_a &= u_{a0} - \frac{1}{3}(u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}) \\ e_b &= u_{b0} - \frac{1}{3}(u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}) \\ e_c &= u_{c0} - \frac{1}{3}(u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}) \end{aligned}\right\} \tag{5.7-16}$$

1）控制的方法。图 5.7-25 是采用 DSP 实现无位置传感器无刷直流电动机调速的控制电路和驱动电路。

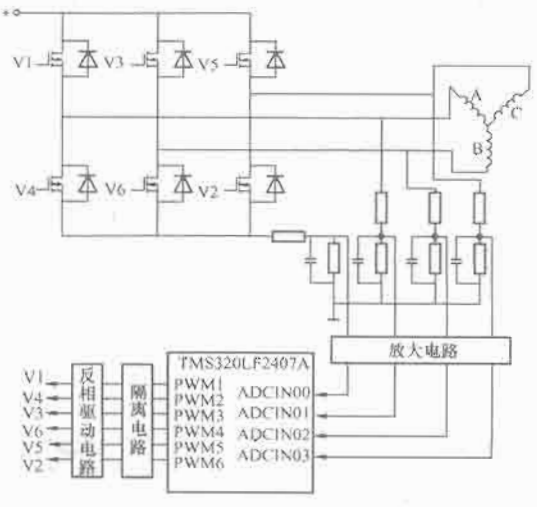


图 5.7-25　DSP 控制和驱动电路

为了计算不通电的感应电动势，需要测量三个相电压。与有位置传感器的硬件电路不同的是，这里增加了相电压测量电路，取代了位置传感器，采用廉价的分压电阻和滤波电容组成。电流信号和各相电压信号经过放大后，分别与DSP的ADCIN00～ADCIN03通道相连。采用双极性PWM控制方式，开关管的工作状态与换相的对应关系如表5.7-1所示。由换相控制字确定程序中的分支关系（跳转关系）。为了简明，电流调节器和速度调节器都采用比例调节器。每50μs进行一次电流调节，与PWM同频；每100ms进行一次速度调节。每50μs对三个相电压采样一次，通过A/D转换变成数字量，根据式（5.7-15）求得中性点电压。因为DSP的乘法运算比除法运算快得多，在计算中性点电压时不除3，而是保留3倍的中性点电压值。在用式（5.7-16）计算感应电动势时，使用3倍的相电压与3倍的中性点电压值相减，而得到3倍的感应电动势值。由于对感应电动势的大小不感兴趣，只对感应电动势的符号变化感兴趣，所以直接用3倍的感应电动势值去判断符号的变化，而省去除法运算。换相的瞬间会产生电磁干扰，这时检测相电压容易产生较大的误差。又因为换相后感应电动势不会立即进入过零点，所以在换相后加一个延时，等待延时过后再进行相电压的检测。由图5.6-13可见，过零点与换相点间隔30°，因此在测得过零点后，还要延迟一段时间才能换相，这个时间称为延迟时间。在程序中，延迟时间是采用以下方法估算的：测得转子刚过一转所用的时间，将这个时间除以12就可以得到转过30°所用的平均时间，用这个平均时间作为下一转的6个过零点与相应的换相点之间的延迟时间。当速度发生变化时，采用这种估算延迟时间的方法会在系统动态响应中产生一个负反馈作用：即当电动机减速时，估算的延迟时间要比实际所需的时间短，使换相点提前，造成电动机加速；当电动机加速时，估算的延迟时间要比实际所需的时间长，使换相点滞后，造成电动机减速，因此这种延迟时间的估算不会影响速度控制。采用磁定位的方法起动无位置传感器无刷直流电动机，起动时，对任意两相通电，使其转到与定子磁场一致的位置，通过一个延时来等待电动机轴停止振荡。使用感应电动势过零检测法时，由于转速越低，其相电压越低，越不易测量，因此电动机的最低转速一般不低于30r/min，速度参考值的设置应考虑这个问题。在磁定位期间，不对速度进行调节，不对延迟时间进行估算，其他操作与正常时一样。

2）控制软件。根据图5.7-25设计了软件程序。PWM采用对称波形，固定频率为20kHz。利用定时器1的周期匹配触发A/D转换，因此每50μs进行一次转换，转换结束后产生中断。A/D转换中断子程序的框图如图5.7-26所示。在A/D转换中断子程序中，主要进行读A/D转换结果、电流调节、速度调节、中性点电压计算、延迟时间计算、感应电动势符号判别和换相准备的操作。另外在磁定位过程中，根据电流调节的结果更新PWM的占空比、磁定位结束的判别操作。

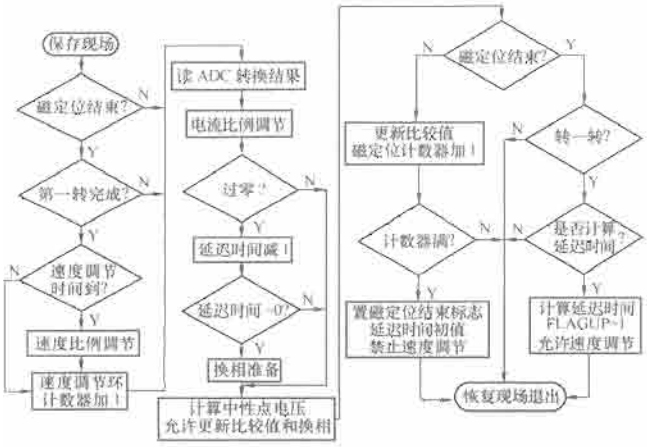


图5.7-26 A/D转换中断子程序框图

在主程序中，初始化后进行磁定位起动电动机操作。之后的主循环程序主要进行换相操作和每50μs一次的更新PWM占空比操作。这些操作是通过调用更新比较值或换相子程序来实现的。该程序框图如图5.7-27所示。

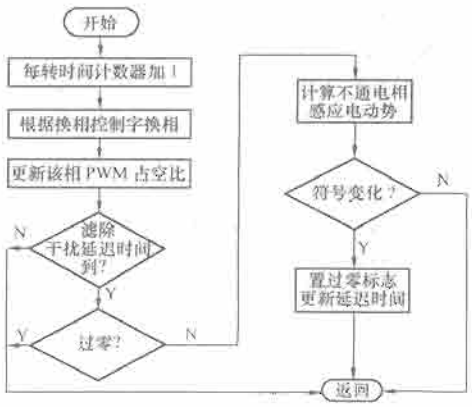


图5.7-27 更新比较值或换相子程序框图

4.2 正弦波驱动永磁直流无刷电动机系统

由本篇第6章可知，正弦波永磁无刷电动机的每相绕组反电动势和输入电流波形都必须是正弦波。每相正弦波反电动势和相电流的频率是由转子转速决定的，通过转子位置传感器检测出转子相对于定子的绝对位置，由伺服驱动器强制产生出正弦波相电流，并使此电流与该相反电动势严格保持同相。它是一种高性能的控制方式，由于可以连续测量出磁场位置，因此就可以对电枢电流幅值和相位进行控制，达到对定子电流瞬间值进行连续的细微控制的要求，理论上可获得与转角无关的恒定输出转矩，有良好的低速平稳性，同时也大大改善了在中、高速大转矩时的特性。

由于可以实现转子磁场方向与电枢电流矢量的磁场在空间上正交，在其他条件一定、无凸极效应时所产生的电磁转矩最大。应该进一步指出，电动机的转子磁通系由转子上的永磁体产生且保持恒定的，所控制的定子电流与磁场正交，完全是用来产生转矩的。这一点和直流伺服电动机是一样的，电磁转矩和定子电流具有线性关系。如果转子磁通和定子电流矢量不是正交的话，则可能导致气隙的有效磁场增加或减少，电动机的运行状态将发生变化。

以模拟控制方式为基础的正弦波永磁无刷直流电动机伺服驱动系统如图5.7-28所示。

比较直流伺服电动机与正弦波永磁无刷直流电动机控制系统也可看出，直流伺服电动机只控制单相电枢回路，而正弦波永磁无刷直流电动机则控制三相电枢绕组。由于正弦波永磁无刷电动机的结构特点，伺服系统还必须具有检测转子磁极位置的电路、正弦波产生电路、直流到正弦变换电路、速度检测电路等。速度指令和速度反馈信号在速度调节器的输入端进行比较，速度调节器的输出信号为电流指令信号，这是一个表征电流幅值的直流量。但电动机是正弦波交流电动机，要求在其定子绕组中通入交流电流。因此，必须将速度调节器输出的直流电流指令交流化，使该交流电流指令的相位由转子磁极位置决定，电流指令的频率由转子磁极的旋

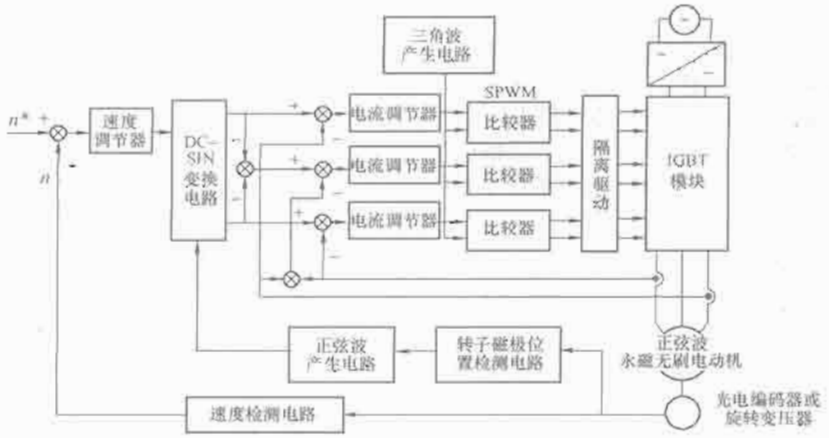


图 5.7-28　模拟控制正弦波永磁无刷直流电动机系统

转速度来决定，并且把电流指令矢量控制在与磁极所产生的磁通相正交的空间位置上，这样就可以基本达到与直流伺服电动机相似的转矩控制。为此，将位置检测器输出的磁极位置信号正弦化，其值在乘法器中与直流电流指令相乘，从而在乘法器的输出端就获得了交流电流指令。交流电流指令值与电流反馈信号相比较后，差值送入电流调节器。依靠电流调节器的高速跟踪能力，使在电动机定子电枢绕组中产生出波形与交流电流指令相似但幅值要高得多的正弦电流，该电流与永磁体相互作用产生电磁转矩，推动正弦波永磁无刷直流电动机运转。

实际上，由于正弦波永磁无刷直流电动机是一个多变量、强耦合、非线性、变参数的复杂系统。因此，利用常规的控制方式（如模拟控制），在一些特殊的运行状态，特别是在高速加载时，达不到令人满意的效果。而在全数字控制方式中，以磁路不饱和、磁滞及涡流的影响忽略不计，定子三相电流产生空间磁动势及永磁转子的磁场分布呈正弦波情况下，经过坐标变换，达到解耦，从而获得和直流伺服电动机类似的控制效果，实现了基于数字控制系统矢量控制。目前在高性能正弦波永磁无刷直流电动机伺服驱动系统中，多采用转子磁场定向矢量控制正弦波永磁无刷直流电动机系统，如图 5.7-29 所示。

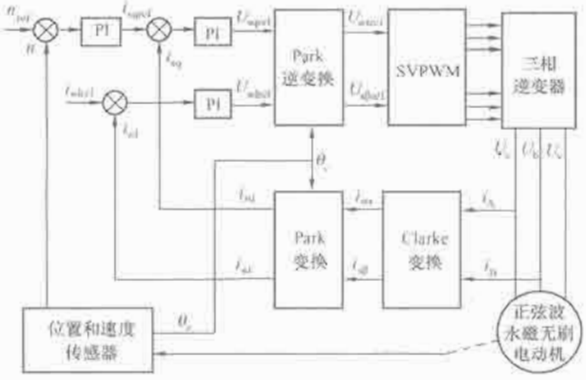


图 5.7-29　正弦波永磁无刷直流电动机磁场定向矢量控制系统结构图

4.2.1　矢量控制技术

（1）等效的旋转磁场

由电机学知道，对于定子上放置对称的三相交流固定绕组和两相交流固定绕组、旋转体上放置直流固定绕组，分别通相应对称电流，产生的旋转磁场完全相同（磁极对数相同、磁感应强度相同、转速相同），因此这三种旋转磁场之间可以互相进行等效变换。通常把三相交流系统向两相交流系统的变换称为 Clarke 变换，或称 3/2 变换；两相交流系统向三相交流系统的变换称为 Clarke 逆变换，或称 2/3 变换；把两相交流系统向旋转的直流系统的变换称为 Park 变换，或称交/直变换；旋转的直流系统向两相交流系统的转换称为 Park 逆变换，或称直/交变换。

（2）矢量控制的基本思想

一个三相交流的磁场系统和一个旋转体上的直流磁场系统，通过两相交流系统作为过渡，可以互相进行等效变换。所以，如果将用于控制交流调速的给定信号变换成类似于直流电动机系统的控制信号，即假想由两相互相垂直的直流绕组同处于一个旋转体上，两个绕组中分别独立地通入由给定信号分解而得的励磁电流信号 i_d 和转矩电流信号 i_q，并把 i_d、i_q 作为基本控制信号，通过等效变换，可以得到与基本控制信号 i_d、i_q 等效的三相交流控制信号 i_a、i_b、i_c，用它们去控制逆变电路。同样，对于电动机在运转过程中系统的三相交流参数（例如电流），又可以等效变成两个互相垂直的直流信号，反馈到控制端，用来修正基本控制信号 i_d、i_q。在进行控制时，可以和直流电动机一样，使其中一个磁场电流（例如 i_d）不变，而控制另一个磁场电流（例如 i_q）信号，从而获得和直流电动机类似的控制效果。

在图 5.7-29 中，检测到的电动机转速 n 和输入的参考转速 n_{ref}，根据转速与转矩的关系，通过速度 PI 控制器计算得到定子电流参考输入 i_{sqref}。定子相电流 i_A 和 i_B 通过相电流检测电路被提取出来，然后用 Clarke 变换将它们变换到定子两相交流坐标系中，使用 Park 变换，再将它们变换到 d、q 旋转坐标系中。d、q 坐标系中的电流信号再与它们的参考输入 i_{sqref} 和 i_{sdref} 相比较，通过 PI 控制器获得理想的控制量，控制信号再通过 Park 逆变换，送到电压空间矢量脉冲宽度调制（SVPWM），从而驱动 IPM 中逆变器模块，得到控制对称的定子三相绕组的实际电流。外环速度环产生定子电流的参考值，内环电流环得到实际控制信号，从而构成一个完整速度、电流的矢量控制双闭环系统。

以上操作可以全部采用软件来完成，实现正弦波永磁无刷电动机的全数字磁场定向矢量实时控制。

（3）矢量控制的坐标变换

电动机内的磁场是由定子、转子三相绕组的磁动势产生的。根据电机旋转磁场理论可知，向对称的三相绕组中通以对称的三相正弦电流时，就会产生合成磁动势，它是一个在空间以 ω 速度旋转的空间矢量。如果用磁动势或电流空间矢

量来描述前面所述的三相交流磁场、两相交流磁场和旋转直流磁场，并对它们进行坐标变换，就称为矢量坐标变换。

矢量坐标变换必须遵循以下原则：①变换前后电流所产生的旋转磁场等效。②变换前后两个系统的电动机功率不变。

1）Clarke 变换及反变换。图 5.7-30 为定子三相绕组 A、B、C 的磁动势矢量和两相电动机绕组 α、β 的磁动势矢量的空间位置关系。其中选定 A 轴与 α 轴重合。

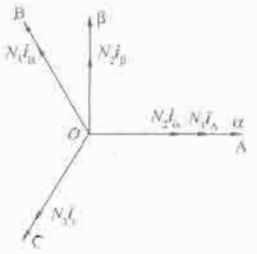


图 5.7-30 三相 A、B、C 绕组和两相 α、β 绕组各相的磁动势

根据矢量坐标变换原则，两者的磁动势应该完全等效，即合成磁动势矢量分别在两个坐标系坐标轴上的投影应该相等。由此得出，Clarke 变换式为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \tag{5.7-17}$$

Clarke 逆变换式为

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \tag{5.7-18}$$

式中，i_0 为一个独立于 i_α 和 i_β 的引进新变量，称它为零轴电流。零轴是同时垂直于 α 和 β 轴的轴，在实际使用中，只作为一个过渡辅助变量。

对于三相绕组不带零线的星形联结，由于 $i_A + i_B + i_C = 0$，变换可以得到简化。

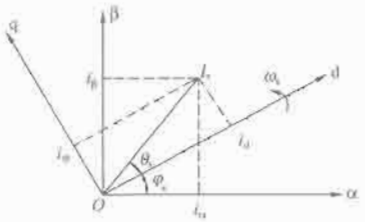


图 5.7-31 定子电流矢量 i_s 在 α、β 坐标系和 d、q 坐标系上的投影

2）Park 变换及反变换。图 5.7-31 是定子电流矢量 i_s 在 α、β 坐标系与 d、q 旋转坐标系的投影。图中，d、q 坐标系是以定子电流角频率 ω_s 速度在旋转。i_s 与 d 轴的夹角为 θ_s，d 轴与 α 轴的夹角为 φ_s，因为 d、q 坐标系是旋转的，因此 φ_s 随时间在变化（$\varphi_s = \omega_s t + \varphi_0$，$\varphi_0$ 是初始角）。由图 5.7-31 可以得到 i_α、i_β 与 i_d、i_q 的关系有

$$i_\alpha = i_d \cos\varphi_s - i_q \sin\varphi_s$$
$$i_\beta = i_d \sin\varphi_s + i_q \cos\varphi_s$$

其矩阵关系式即为 Park 变换。

Park 变换为

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_s & \sin\varphi_s \\ -\sin\varphi_s & \cos\varphi_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{5.7-19}$$

Park 逆变换为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_s & -\sin\varphi_s \\ \sin\varphi_s & \cos\varphi_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \tag{5.7-20}$$

从式（5.7-19）和式（5.7-20）可以看出，Park 变换必须知道 d 轴与 α 轴之间的夹角，此角一般由安装于电动机端部的位置传感器获得。

4.2.2 空间电压矢量脉宽调制

经典的 SPWM 控制主要着眼于使逆变器的输出电压尽量接近正弦波，并未顾及输出电流的波形。而交流电动机需要输入三相正弦电流的最终目的是在电动机空间形成圆形旋转磁场，从而产生恒定的电磁转矩。如果对准这一目标，把逆变器和交流电动机视为一体，按照跟踪圆形旋转磁场来控制逆变器的工作，其效果应该更好。这种控制方法称为磁链跟踪控制，磁链的轨迹是交替使用不同的电压空间矢量得到的，所以又称为空间矢量脉宽调制（SVPWM）。

（1）电压矢量与磁链矢量的关系

用三相平衡的正弦电压向交流电动机供电时，电动机的定子磁链空间矢量幅值恒定，并以恒速旋转，磁链矢量的运动轨迹形成圆形的空间旋转磁场（磁链圆）。因此如果有一种方法，使逆变电路能向交流电动机提供可变频电源，并能保证电动机形成定子磁链圆，就可以实现交流电动机的变频调速。

电压空间矢量是按照电压加在绕组的空间位置来定义的。电动机的三相定子绕组可以定义一个三相平面静止坐标系，如图 5.7-32 所示。它有三个轴，互相间隔 120°，分别代表三相。三相定子相电压 U_A、U_B、U_C 分别施加在三相绕组上，形成三个相电压空间矢量 $\boldsymbol{u}_A$、$\boldsymbol{u}_B$、$\boldsymbol{u}_C$。它们的方向始终在各相的轴线上，大小则随时间按正弦规律变化。因此，三个相电压空间矢量相加所形成的合成电压空间矢量 $\boldsymbol{u}$ 是以电源角频率 ω 速度旋转的空间矢量。

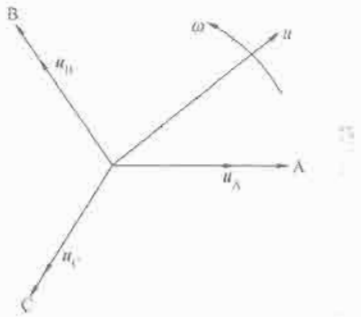


图 5.7-32 电压空间矢量

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}_A + \boldsymbol{u}_B + \boldsymbol{u}_C \tag{5.7-21}$$

同样也可以定义电流和磁链的空间矢量 $\boldsymbol{I}$ 和 $\boldsymbol{\psi}$。因此有

$$\boldsymbol{u} = R\boldsymbol{I} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}}{\mathrm{d}t} \tag{5.7-22}$$

当转速不是很低时，定子电阻 R 的压降相对较小，上式可简化为

$$u=\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}\text{ 或 }\psi=\int u\mathrm{d}t$$

因为 $\psi=\psi_m e^{j\omega t}$，所以

$$u=\frac{\mathrm{d}\left(\psi_m e^{j\omega t}\right)}{\mathrm{d}t}=j\omega\psi_m e^{j\omega t}=\omega\psi_m e^{j(\omega t+\pi/2)} \tag{5.7-23}$$

上式说明，当磁链幅值 Ψ_m 一定时，u 的大小与 ω 成正比，或者说供电电压与频率 f 成正比，其方向是磁链圆轨迹的切线方向。当磁链矢量在空间旋转 1 周时，电压矢量也连续地按磁链圆的切线方向运动 2πrad，其运动轨迹与磁链圆重合。这样，电动机旋转磁场的形状问题就可转化为电压空间矢量运动轨迹的形状问题来讨论。

（2）基本电压空间矢量

如图 5.7-4 所示电压型逆变器。利用这种逆变器功率开关管的开关状态和顺序组合，以及开关时间的调整，以保证电压空间矢量圆形运行轨迹为目标，就可以产生谐波较少的，且直流电源电压利用率较高的输出。

图 5.7-4 中的 V1～V6 是 6 个功率开关管，a、b、c 分别代表 3 个桥臂的开关状态。规定：当上桥臂开关管“开”状态时（此时下桥臂开关管必然是“关”状态），开关状态为 1；当下桥臂开关管“开”状态时（此时上桥臂开关管必然是“关”状态），开关状态为 0。三个桥臂只有“1”或“0”两种状态，因此 a、b、c 形成 000、001、010、011、100、101、110、111 共 8 种（$2^3=8$）开关模式，其中 000 和 111 开关模式逆变器输出电压为零，这两种开关模式为零状态。

可以推导出，当 U_{DC} 是直流电源电压（母线电压）时，三相逆变器输出的线电压矢量 $[U_{AB}\quad U_{BC}\quad U_{CA}]^T$ 与开关状态矢量 $[a\quad b\quad c]^T$ 的关系为

$$\begin{bmatrix}U_{AB}\\U_{BC}\\U_{CA}\end{bmatrix}=U_{DC}\begin{bmatrix}1&-1&0\\0&1&-1\\-1&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\b\\c\end{bmatrix} \tag{5.7-24}$$

三相逆变器输出的相电压矢量 $[U_A\quad U_B\quad U_C]^T$ 与开关状态矢量 $[a\quad b\quad c]^T$ 的关系为

$$\begin{bmatrix}U_A\\U_B\\U_C\end{bmatrix}=\frac{1}{3}U_{DC}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\b\\c\end{bmatrix} \tag{5.7-25}$$

同电流 Clarke 变换一样，三相逆变器输出的相电压矢量 $[U_A\quad U_B\quad U_C]^T$ 与 α、β 平面直角坐标系电压空间矢量 $[U_\alpha\quad U_\beta]^T$ 变换矩阵关系为式（5.7-26），其 α 轴与 A 轴重合，β 轴超前 α 轴 90°。

$$\begin{bmatrix}U_\alpha\\U_\beta\end{bmatrix}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}1&-\frac{1}{2}&-\frac{1}{2}\\0&\frac{\sqrt{3}}{2}&-\frac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}U_A\\U_B\\U_C\end{bmatrix} \tag{5.7-26}$$

式（5.7-24）、式（5.7-25）和式（5.7-26）的对应关系可用表 5.7-2 来表示。将表 5.7-2 中的 8 组相电压值代入式（5.7-21），就可以求出这些相电压的矢量和相位角。这 8 个矢量就称为基本电压空间矢量。根据其相位角的特点分别命名为 $\boldsymbol{O}_{000}$、$\boldsymbol{U}_0$、$\boldsymbol{U}_{60}$、$\boldsymbol{U}_{120}$、$\boldsymbol{U}_{180}$、$\boldsymbol{U}_{240}$、$\boldsymbol{U}_{300}$、$\boldsymbol{O}_{111}$，其中 $\boldsymbol{O}_{000}$、$\boldsymbol{O}_{111}$ 称为零矢量。图 5.7-33 给出了 8 个基本电压空间矢量的大小和位置。其中非零矢量的幅值相同，相邻的矢量间隔 60°，而两个零矢量幅值为零，位于中心。图 5.7-33 也给出了 α、β 平面直角坐标系电压空间矢量的大小和位置。

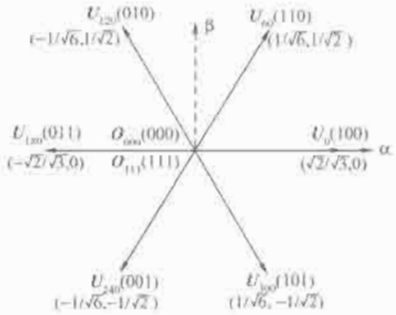


图 5.7-33　基本电压空间矢量

表 5.7-2　　开关状态与相电压和线电压及在 α、β 坐标系分量的对应关系

a	b	c	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_α	U_β	矢量符号
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\boldsymbol{O}_{000}$
1	0	0	$2U_{DC}/3$	$-U_{DC}/3$	$-U_{DC}/3$	U_{DC}	0	$-U_{DC}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{DC}$	0	$\boldsymbol{U}_0$
1	1	0	$U_{DC}/3$	$U_{DC}/3$	$-2U_{DC}/3$	0	U_{DC}	$-U_{DC}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}U_{DC}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U_{DC}$	$\boldsymbol{U}_{60}$
0	1	0	$-U_{DC}/3$	$2U_{DC}/3$	$-U_{DC}/3$	$-U_{DC}$	U_{DC}	0	$-\sqrt{\frac{1}{6}}U_{DC}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U_{DC}$	$\boldsymbol{U}_{120}$
0	1	1	$-2U_{DC}/3$	$U_{DC}/3$	$U_{DC}/3$	$-U_{DC}$	0	U_{DC}	$-\sqrt{\frac{2}{3}}U_{DC}$	0	$\boldsymbol{U}_{180}$
0	0	1	$-U_{DC}/3$	$-U_{DC}/3$	$2U_{DC}/3$	0	$-U_{DC}$	U_{DC}	$-\sqrt{\frac{1}{6}}U_{DC}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U_{DC}$	$\boldsymbol{U}_{240}$
1	0	1	$U_{DC}/3$	$-2U_{DC}/3$	$U_{DC}/3$	U_{DC}	$-U_{DC}$	0	$\sqrt{\frac{1}{6}}U_{DC}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U_{DC}$	$\boldsymbol{U}_{300}$
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	$\boldsymbol{O}_{111}$

(3) 磁链轨迹的控制

当逆变器单独输出基本电压空间矢量 $\boldsymbol{U}_0$ 时，电动机的定子磁链矢量 $\boldsymbol{\Psi}$ 的矢端从 A 到 B 沿平行于 $\boldsymbol{U}_0$ 方向移动，如图 5.7-34 所示。当移动到 B 点时，如果改基本电压空间矢量为 $\boldsymbol{U}_{60}$ 输出，则定子磁链矢量 $\boldsymbol{\Psi}$ 的矢端也相应改为从 B 到 C 的移动。这样下去，当全部 6 个非零基本电压空间矢量分别依次单独输出后，定子磁链矢量 $\boldsymbol{\Psi}$ 矢端的运动轨迹是一个正六边形。

显然，按照这样的供电方式只能形成正六边形的旋转磁场，而不是希望的圆形旋转磁场。如果在定子里形成的旋转磁场不是正六边形，而是正多边形，就可以得到近似的圆形旋转磁场。显然，正多边形的边越多，近似程度就越好。但是非零的基本电压空间矢量只有 6 个，如果想获得尽可能多的多边形旋转磁场，就必须有更多的逆变器开关状态。一种方法是利用 6 个非零的基本电压空间矢量的线性时间组合来得到更多的开关状态。下面介绍这种线性时间组合的方法。

在图 5.7-35 中，$\boldsymbol{U}_x$ 和 $\boldsymbol{U}_{x+60}$ 代表相邻的两个基本电压空间矢量；$\boldsymbol{U}_{OUT}$ 是输出的参考相电压矢量，其幅值代表相电压的幅值，其旋转角速度就是输出正弦电压的角频率。$\boldsymbol{U}_{OUT}$ 可由 $\boldsymbol{U}_x$ 和 $\boldsymbol{U}_{x+60}$ 线性时间组合来合成，它等于 T_1/T_{PWM} 倍的 $\boldsymbol{U}_x$ 与 T_2/T_{PWM} 倍的 $\boldsymbol{U}_{x+60}$ 的矢量和。其中 T_1 和 T_2 分别是 $\boldsymbol{U}_x$ 与 $\boldsymbol{U}_{x+60}$ 作用的时间；T_{PWM} 是 $\boldsymbol{U}_{OUT}$ 作用的总时间（调制周期）。

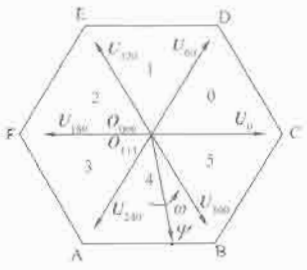


图 5.7-34 正六边形磁链轨迹

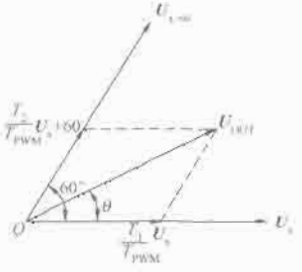


图 5.7-35 电压空间矢量的线性组合

按照这种方式，在下一个 T_{PWM} 期间，仍然用 $\boldsymbol{U}_x$ 和 $\boldsymbol{U}_{x+60}$ 线性时间组合，但作用的时间 T'_1 和 T'_2 与上一次的不同，它们必须保证所合成的新的电压空间矢量 $\boldsymbol{U}'_{OUT}$ 与原来的电压空间矢量 $\boldsymbol{U}_{OUT}$ 的幅值相等。

如此下去，在每一个 T_{PWM} 期间，都改变相邻基本矢量作用的时间，并保证所合成的电压空间矢量的幅值都相等。因此，当 T_{PWM} 取足够小时，电压空间矢量的轨迹是一个近似圆形的正多边形。

(4) t_1、t_2 和 t_0 及扇区的计算

如上面所述，线性时间组合的电压空间矢量为

$$\boldsymbol{U}_{OUT}=\frac{T_1}{T_{PWM}}\boldsymbol{U}_x+\frac{T_2}{T_{PWM}}\boldsymbol{U}_{x+60} \tag{5.7-27}$$

在实际应用计算中，并不是从合成的电压矢量或者基本的空间电压矢量来求得 T_1 和 T_2。而是通过 α、β 坐标系来计算。通过此坐标系可以计算出此时合成电压矢量所在的扇区以及在该扇区内 PWM 导通的脉冲宽度时间 T_1 和 T_2。

在图 5.7-36 中，$\sum U_{s\alpha}$ 表示 $\boldsymbol{U}_0$ 和 $\boldsymbol{U}_{60}$ 的 α 轴分量之和，$\sum U_{s\beta}$ 表示 $\boldsymbol{U}_0$ 和 $\boldsymbol{U}_{60}$ 的 β 轴分量之和，结合表 5.7-2，可知基本空间矢量的幅值均扩大 $\sqrt{2}/\sqrt{3}$ 倍，都为 $2U_{DC}/3$，故有如下等式

$$\left.\begin{aligned}\sum U_{s\beta}&=0+\frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}=\frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}\\ \sum U_{s\alpha}&=\frac{2}{3}U_{DC}+\frac{1}{3}U_{DC}=U_{DC}\end{aligned}\right\} \tag{5.7-28}$$

在图 5.7-36 中的情况下，参考电压矢量 $\boldsymbol{U}_{OUT}$ 位于被基本电压空间矢量 $\boldsymbol{U}_0$ 和 $\boldsymbol{U}_{60}$ 所包围的扇区中，因此 $\boldsymbol{U}_{OUT}$ 可以用 $\boldsymbol{U}_0$ 和 $\boldsymbol{U}_{60}$ 两个矢量来表示，于是有如下等式

$$\left.\begin{aligned}T_{PWM}&=T_1+T_2+T_0\\ \boldsymbol{U}_{OUT}&=\frac{T_1}{T_{PWM}}\boldsymbol{U}_0+\frac{T_2}{T_{PWM}}\boldsymbol{U}_{60}\end{aligned}\right\} \tag{5.7-29}$$

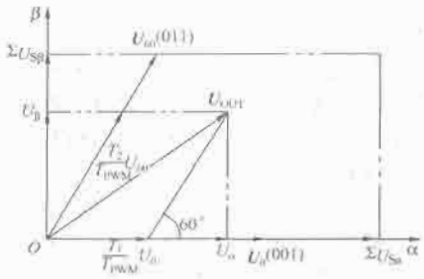


图 5.7-36 $\boldsymbol{U}_{OUT}$ 和 U_α、U_β 以及 $\boldsymbol{U}_0$、$\boldsymbol{U}_{60}$ 的对应关系

式中，T_1 和 T_2 分别是在周期时间 T_{PWM} 中基本电压空间矢量 $\boldsymbol{U}_0$ 和 $\boldsymbol{U}_{60}$ 各自的作用时间；T_0 是零矢量的作用时间，T_1 和 T_2 可由以下公式计算

$$\left.\begin{aligned}U_\alpha&=\frac{T_1}{T_{PWM}}|\boldsymbol{U}_0|+\frac{T_2}{T_{PWM}}|\boldsymbol{U}_{60}|\cos60^\circ\\ U_\beta&=\frac{T_2}{T_{PWM}}|\boldsymbol{U}_{60}|\sin60^\circ\end{aligned}\right\} \tag{5.7-30}$$

从前面的表述不难看出，所有的基本电压空间矢量的幅值都为 $2U_{DC}/3$。如果它们取相对于最大的相电压 $U_{DC}/\sqrt{3}$（最大的线电压 U_{DC}，则最大的相电压为 $U_{DC}/\sqrt{3}$）的标么值，则空间矢量幅值变成 $2/\sqrt{3}$，即经过归一化后的空间矢量的幅值为 $|\boldsymbol{U}_0|=|\boldsymbol{U}_{60}|=2/\sqrt{3}$，代入式 (5.7-30) 得

$$\left.\begin{aligned}T_1&=\frac{T_{PWM}}{2}(\sqrt{3}U_\alpha-U_\beta)\\ T_2&=T_{PWM}U_\beta\end{aligned}\right\} \tag{5.7-31}$$

在上面的两式中，U_α 和 U_β 表示矢量 $\boldsymbol{U}_{OUT}$ 相对于最大的相电压 $U_{DC}/\sqrt{3}$ 归一化后（即取标么值）的 α、β 轴分量。$T_0=T_{PWM}-T_1-T_2$ 是零矢量的作用时间。取 T_1、T_2 与周期 T_{PWM} 的相对值分别为 t_1、t_2，则有如下等式

$$\left.\begin{aligned}t_1&=\frac{T_1}{T_{PWM}}=\frac{1}{2}(\sqrt{3}U_\alpha-U_\beta)\\ t_2&=\frac{T_2}{T_{PWM}}=U_\beta\end{aligned}\right\} \tag{5.7-32}$$

同理也可求得其他扇区。如果定义如下式的 X、Y 和 Z 这 3 个变量

$$\left.\begin{aligned}X&=U_\beta\\ Y&=\frac{1}{2}(\sqrt{3}U_\alpha+U_\beta)\\ Z&=\frac{1}{2}(-\sqrt{3}U_\alpha+U_\beta)\end{aligned}\right\} \tag{5.7-33}$$

当 $\boldsymbol{U}_{OUT}$ 位于空间矢量所包含的扇区中时，相应的 t_1 和 t_2 也可以用 X、Y 或 Z 表示，它们的对应关系见表 5.7-3。

表 5.7-3　t_1、t_2与 X、Y 和 Z 的对应关系表

扇区	U_0、U_{60}	U_{60}、U_{120}	U_{120}、U_{180}	U_{180}、U_{240}	U_{240}、U_{300}	U_{300}、U_0
t_1	$-Z$	Z	X	$-X$	$-Y$	Y
t_2	X	Y	$-Y$	Z	$-Z$	$-X$

已知一个矢量 $\boldsymbol{U}_{OUT}$，如果要利用上表计算 t_1 和 t_2，则必须知道 $\boldsymbol{U}_{OUT}$ 所在的扇区。

一般可言，可以用矢量 $\boldsymbol{U}_{OUT}$ 轴分量 U_α 和 U_β 来表示矢量本身，则可以把 3 个参考量 U_{ref1}、U_{ref2} 和 U_{ref3} 用 U_α 和 U_β 来表示，其关系式如下

$$\left.\begin{aligned} U_{ref1} &= U_\beta \\ U_{ref2} &= \frac{-U_\beta + U_\alpha \times \sqrt{3}}{2} \\ U_{ref3} &= \frac{-U_\beta - U_\alpha \times \sqrt{3}}{2} \end{aligned}\right\} \tag{5.7-34}$$

定义 3 个变量 a、b、c。如果 $U_{ref1}>0$，则 $a=1$，否则 $a=0$；如果 $U_{ref2}>0$，则 $b=1$，否则 $b=0$；如果 $U_{ref3}>0$，则 $c=1$，否则 $c=0$。设 $N=4c+2b+a$，则 N 与扇区（Sector）数的对应关系见表 5.7-4。

表 5.7-4　N 与扇区数的对应关系表

N	1	2	3	4	5	6
扇区数	1	5	0	3	2	4

第 0 扇区即为基本电压空间矢量 $\boldsymbol{U}_0$ 和 $\boldsymbol{U}_{60}$ 包围的扇区，第 1 扇区即为基本电压空间矢量 $\boldsymbol{U}_{60}$ 和 $\boldsymbol{U}_{120}$ 包围的扇区，…，第 5 扇区即为基本电压空间矢量 $\boldsymbol{U}_{300}$、$\boldsymbol{U}_0$ 包围的扇区。

如果已知参考电压矢量 $\boldsymbol{U}_{OUT}$ 在 α、β 坐标系中的 α、β 轴分量 U_α 和 U_β，就可以根据上面推导计算出与 $\boldsymbol{U}_{OUT}$ 对应的两个基本电压空间矢量的作用时间相对 SVPWM 控制周期 T_{PWM} 的比例 t_1 和 t_2。如果知道了 t_1 和 t_2，又知道要求的 SVPWM 的控制周期 T_{PWM}，则就可以确定电压空间矢量分别作用时间 T_1 和 T_2。再加上其他一些推导，就可以很方便地实现 SVPWM 算法了，即为

$$\left.\begin{aligned} t_{aon} &= \frac{T_{PWM} - T_1 - T_2}{2} \\ t_{bon} &= t_{aon} + T_1 \\ t_{con} &= t_{bon} + T_2 \end{aligned}\right\} \tag{5.7-35}$$

添加零矢量是遵循使功率开关管的开关次数最少的原则来选择 $\boldsymbol{O}_{000}$ 和 $\boldsymbol{O}_{111}$。为了使磁链的运动速度平滑，零矢量一般都不是集中地加入，而是将零矢量平均分成几份，多点插入到磁链轨迹中，但作用的时间和仍为 T_0。这样可以减少电动机转矩的脉动。图 5.7-37 即为目前流行的七段式电压空间矢量在 $\boldsymbol{U}_0$ 和 $\boldsymbol{U}_{60}$ 之间扇区时的 PWM 波形和占空比。

如上所述，一个扇区内所分的小区间越多，就越能逼近

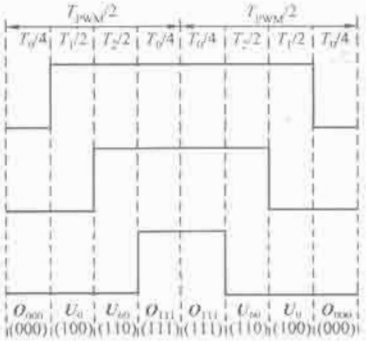


图 5.7-37　第Ⅰ扇区内一段区间的开关序列与逆变器三相电压波形

圆形旋转磁场。此时需选用高开关频率的功率开关管。归纳起来，SVPWM 控制模式有以下特点：①逆变器的一个工作周期分成 6 个扇区，每个扇区相当于常规六拍逆变器的一拍。为了使电动机旋转磁场逼近圆形，每个扇区再分成若干个小区间 T_{PWM}。T_{PWM} 越短，旋转磁场越接近圆形，但 T_{PWM} 的缩短受到功率开关管允许开关频率的制约。②在每个小区间内虽有多次开关状态的切换，但每次切换都只涉及一个功率开关管，因而开关损耗较小。③每个小区间均以零电压矢量开始，又以零矢量结束。④利用电压空间矢量直接生成三相 PWM 波，计算简便。⑤采用 SVPWM 控制时，逆变器输出线电压基波最大值为直流侧电压，这比一般的 SPWM 逆变器输出电压提高了。

4.2.3　磁场定向控制

在正弦波永磁无刷直流电动机控制中，由于转子上的永磁体产生磁通恒定，故只进行定子的坐标变换，由此可得出不同的控制策略。

图 5.7-38（图中转子的磁极对数为 1）表示了定子三相不动坐标系 A、B、C 与转子同步旋转坐标系 d、q 的位置关系。定子电流矢量 i_s 在 d、q 坐标系上的投影为 i_d、i_q，其中 $i_d=i_s\cos\beta$；$i_q=i_s\sin\beta$。i_s 为三相对称正弦波电流的合成，三相电流分别为 i_a、i_b、i_c，通过 Clarke 变换和 Park 变换可从 i_a、i_b、i_c 求得 i_d、i_q。而且 i_d、i_q 为直流量。

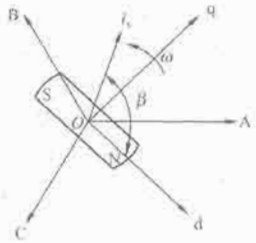


图 5.7-38　定子三相不动坐标系 A、B、C 与转子同步旋转坐标系 d、q 的位置关系

正弦波永磁无刷直流电动机的转矩方程为

$$T_m = p(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) = p[\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \tag{5.7-36}$$

式中，Ψ_d、Ψ_q 为磁链在 d、q 轴的分量；Ψ_f 为转子磁钢在定子上的耦合磁链，它只在 d 轴上存在；p 为转子的磁极对数；L_d、L_q 为电动机 d、q 轴的主电感；T_m 为电磁转矩。

式（5.7-36）说明了转矩由两项组成。括号中的第一项是由三相旋转磁场和永磁磁场相互作用所产生的电磁转矩；第二项是由凸极效应引起的磁阻转矩。对于结构为嵌入式转子，$L_d<L_q$，电磁转矩和磁阻转矩同时存在。可以灵活有效地利用这个磁阻转矩，通过调整和控制 β 角，用最小的电流幅值来获得最大的输出转矩。对于结构为凸装式转子，$L_d=L_q$，因此只存在电磁转矩，而不存在磁阻转矩。

定子电流的 d 轴分量 i_d 相当于励磁电流。关于 i_d 的控制，在不同的实际应用场合下主要有两种控制策略。

（1）控制 $i_d=0$ 实现线性化转矩控制输出

目前大多数的正弦波永磁无刷直流电动机用于进给驱动，电动机工作于其额定转速以下，属于恒转矩调速方式。在这类应用场合中，追求的是在一定的定子电流幅值下能够实现线性化转矩控制输出，因此最佳的控制方式是使定子电流与 d 轴正交，与 q 轴重合，也就是要保持 $i_d=0$。在这种控制方式下，从模型上看正弦波永磁无刷直流电动机已经相当于永磁直流电动机，其转矩表达式为

$$T_m = p\Psi_f i_q = p\Psi_f i_s \sin\beta \tag{5.7-37}$$

由式（5.7-37）可以明显看出，当三相合成电流矢量 i_s 与 d 轴的夹角 β 等于 90°时，可以获得线性化转矩控制输出，也就是说 i_s 与 q 轴重合时转矩与电流成正比，这时，$i_d=0$，$i_q=i_s$。故式（5.7-37）可以改写为

$$T_m = p\Psi_f i_q = p\Psi_f i_s \qquad (5.7\text{-}38)$$

因为是永磁转子，Ψ_f 是一个不变的值，所以式（5.7-38）说明了只要保持 i_s 与 d 轴垂直，就可以像直流电动机那样控制，通过调整直流量 i_q 来控制转矩，从而实现正弦波永磁无刷直流电动机的参数解耦，实现转矩的线性化控制。此种方法称为“磁场定向”法。

（2）控制 $i_d<0$ 达到弱磁升速的目的

从式（5.7-36）中可以看出，当 $i_d<0$ 时，其作用是去磁，抵消转子磁场。在有些应用场合，希望电动机的转速超过其额定值。在额定转速以上不能靠提高逆变器输出电压的办法来升速，只能靠控制 i_d 为负值的办法来实现。由于 i_d 的去磁作用，使总的磁场减弱，从而在保持电压不变的情况下实现了弱磁升速。

除以上两种方法外，还有功率因数等于 1、转矩电流比最大、恒磁链控制方法等。这五种方法特点分别是：①$i_d=0$ 控制方法比较简单，电磁转矩和电枢电流成线性关系，无去磁效应；缺点是随输出转矩增加，端电压增加较快，功率因数下降，对逆变器容量要求提高。为保证电流环动态跟随，随着电动机转速升高，外加电压应越高。对有凸极效应的正弦波永磁无刷直流电动机而言，该方法没有充分利用磁阻转矩，没有充分发挥电动机转矩输出能力。②$i_d<0$ 控制方法。电动机的相电流要有一定的限制，当 i_d 负向增加后，必须相应减小 i_q，以保持相电流幅值的不变。③功率因数等于 1 的控制方法。逆变器的容量得到充分利用。但该方法在同等电流下输出转矩较小，电磁转矩存在一个极大值，该极值较小，对应某一电磁转矩有两个定子电流值与之对应。④转矩电流比最大控制方式时，电动机在输出转矩满足要求情况下定子电流最小。这可以减小铜损耗，提高效率，有利于逆变器开关管的工作。在该方法基础上，若再加入弱磁控制，可改善电动机恒功率运行区电动机输出转矩性能，因而是一种优异的电流控制方法。但该方法运算复杂、运算量比较大。⑤恒磁链控制方法可以获得比较高的功率因数，在一定程度上提高了电动机的最大输出转矩，也存在最大输出转矩限制问题，但比起功率因数等于 1 的控制方式，其最大输出转矩要大一倍。对比上述 5 种电流控制方法，对于正弦波永磁无刷直流电动机系统，由于装置功率一般不大，对装置的过载能力及转矩响应性能有比较高的要求，因此适合使用 $i_d=0$ 及转矩电流比最大的电流控制方法。

4.2.4 全数字正弦波驱动控制

（1）硬件构成

图 5.7-39 为带位置传感器的正弦波永磁无刷直流电动机全数字双闭环调速的控制和驱动电路框图。

DSP 提供 6 路 PWM 输出至三相功率逆变器。逆变器输出的电动机两相引线中串有霍尔电流传感器，通过其上的采样电阻把绕组电流转化为对应的电压，通过 A/D 转换通路送入 DSP 中。DSP 在每个 PWM 周期中采样电动机定子的相电流。电动机轴上装有光电编码器，从而可以获得电动机转子的转动角度。光电编码器的输出直接连到 DSP 的 QEP/CAP 口线上，DSP 可以通过读取 QEP 的脉冲计数值获得转子的位置角，通过读取光电编码器的绝对位置状态信号，决定转子磁极初始上电位置。这样，就可以实现正弦波永磁无刷直流电动机的磁场定向控制。

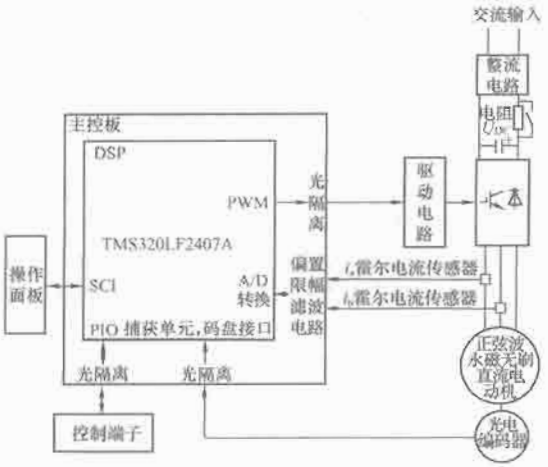


图 5.7-39 DSP 控制和驱动电路框图

（2）控制软件

该系统的软件设计可简单分为两个部分：一个是系统的初始化；一个是控制模块。其中第一个模块只在系统上电时被执行一次，而第二个模块在每次 PWM 下溢事件发生之后都将被唤醒执行。图 5.7-40 简单说明了这两个模块在时序上的关系。完整的控制算法都将在 PWM 中断服务程序中得到执行，其运行的频率和 PWM 的频率完全一样。可以在 PWM 的等待循环中加入一些控制信息显示模块，从而更加方便地直接观测到系统运行的信息。图 5.7-41 为下溢事件程序基本框图。

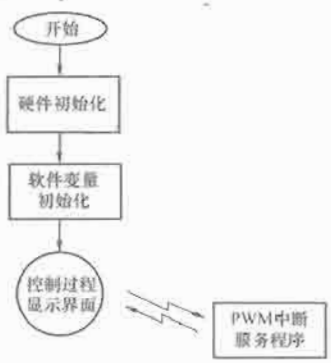


图 5.7-40 控制软件时序说明

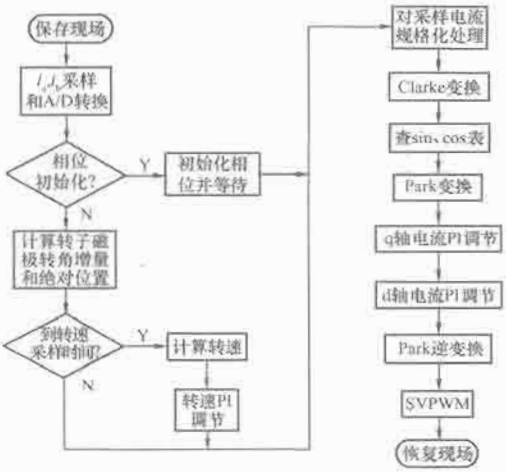


图 5.7-41 下溢事件程序基本框图

DSP 中的全比较单元将产生控制脉冲信号，并送到电动机驱动模块中。以定时器作为时基，产生频率为 20kHz 的全对称 PWM 波，采样时间设为 50μs。系统初始化以后，

软件进入等待循环，此时可以激活用户界面，监督系统的实际运行情况。在每次中断发生，控制模块就被激活，完成一个周期的 PWM 设置。

5　直流伺服电动机控制

5.1　控制回路

在直流伺服电动机中，励磁磁场和电枢电流在空间上正交，并且可以分别独立控制。在保持磁场不变的情况下，电动机所产生的电磁转矩和电枢电流成正比，改变施加于电枢两端的电压就可以调节电动机的速度。图 5.7-42 所示为以模拟控制方式为基础的直流伺服电动机系统框图。

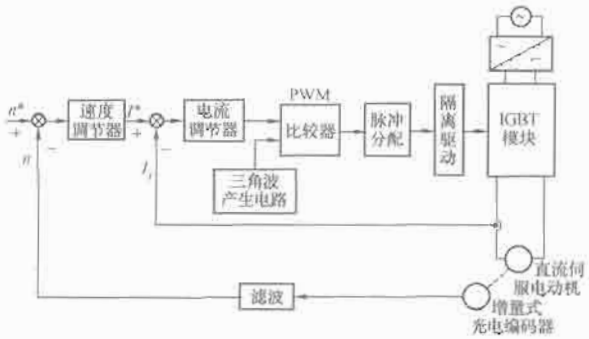


图 5.7-42　以模拟控制方式为基础的直流伺服电动机系统框图

5.2　全数字直流伺服电动机控制

（1）硬件构成

基于 DSP 的全数字直流位置伺服电动机控制系统，如图 5.7-43 所示。

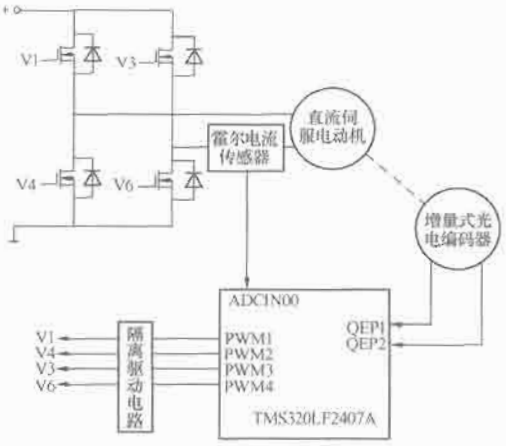


图 5.7-43　全数字直流位置伺服电动机控制系统框图

图中采用了 H 型逆变器驱动电路，通过 DSP 的 PWM 输出引脚 PWM1～PWM4 输出的控制信号进行控制。用霍尔电流传感器检测电流变化，并通过 ADCIN00 引脚输入给 DSP，经 A/D 转换产生电流反馈信号。采用增量式光电编码器检测电动机的速度变化，经 QEP1、QEP2 引脚输入给 DSP，获得速度反馈信号。它还可以很容易地实现位置控制。

（2）控制软件

用 DSP 实现直流伺服电动机速度控制的软件由三部分组成：初始化程序、主程序、中断子程序。

其中，主程序只进行电动机的转向判别，用来改变比较方式寄存器 ACTRA 的设置。用户可以在主程序中添加其他应用程序。

在每个 PWM 周期（50μs）都进行一次电流采样和电流 PI 调节，因此电流采样周期与 PWM 周期相同，以实现实时控制。

采用定时器 1 周期中断标志来启动 A/D 转换，转换结束后申请 A/D 转换中断。图 5.7-44 是 A/D 转换中断处理子程序框图。全部控制功能都通过中断处理子程序来完成。

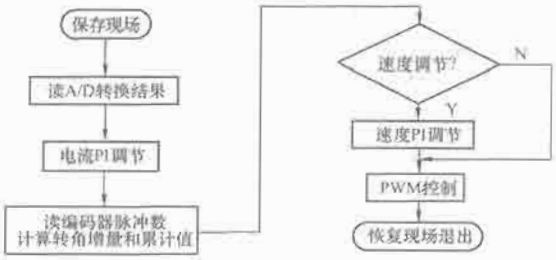


图 5.7-44　A/D 转换中断处理子程序框图

由于速度控制时间常数较大，本程序设计每 100 个 PWM 周期（即 5ms）对速度进行一次 PI 调节。

程序中的速度 PI 调节和电流 PI 调节的各个参数可根据用户特殊应用要求在初始化程序中改写。

6　感应电动机伺服控制

感应电动机具有坚固、可靠、廉价、高效的优点，在工业生产中获得了大量应用。但主要是控制困难，即使是幅度很小的调速也是如此。虽然它的机械结构非常简单，数学模型却非常复杂，并且其参数还会随温度的改变而变化。以前，感应电动机通常被直接用于电气传动，或者使用电压频率比恒定的方法加以控制。如果要设计可精确调速的系统，则会碰到很多难题，如工作效率、可靠性和电磁兼容等。经过人们长久的努力，感应电动机伺服控制方法取得了新的进展，主要体现在由标量控制向高动态性能矢量控制的发展和开发无速度传感器的矢量控制和直接转矩控制系统方面，采用高性能的 DSP，能够设计实现高可靠性、高精度的感应电动机伺服控制系统。

6.1　结构图

感应电动机的 DSP 全数字伺服控制系统的结构基本上与正弦波永磁无刷直流电动机控制相似。在该图中只增加电流—磁链位置转换模块，以求出转子磁链位置，用于参与 Park 变换和 Park 逆变换的计算，还要进行转子的坐标变换。以上操作可以全部采用软件来完成，从而实现感应电动机的全数字伺服实时控制。图 5.7-45 所示为采用 DSP 时感应电动机磁场定向矢量控制系统结构框图。

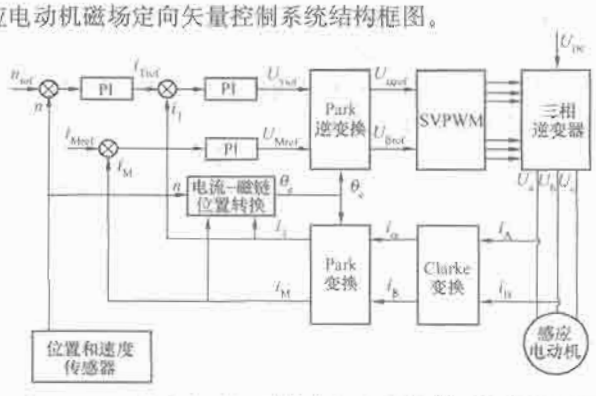


图 5.7-45　感应电动机磁场定向矢量控制系统结构框图

6.2 转子磁链位置计算

感应电动机转子机械转速并不等于转子磁链转速。这就是说，不能通过位置传感器或速度传感器直接检测到感应电动机的转子磁链位置。转子磁链位置在感应电动机矢量控制中是一个非常重要的参数，没有它就无法进行 Park 变换和 Park 逆变换。因此必须寻找一种能够获得转子磁链位置的方法。下面来推导转子磁链位置的计算方法。

设定子 Park 变换后为两相旋转 MT 坐标系，M 为直轴，T 为交轴，其绕组电流分别为 i_M 和 i_T。转子 Clarke 变换后为两相转子绕组 dq 坐标系，d 轴为直轴，与转子三相绕组 a 轴重合，其绕组电流分别为 i_d 和 i_q。

在 MT 坐标系中，电动机的电流模型满足下式

$$i_M = \frac{L_r}{R_r}\frac{di_d}{dt} + i_d \tag{5.7-39}$$

$$F_s = \frac{d\theta/dt}{\omega_0} = n + \frac{i_T}{\frac{L_r}{R_r} i_d \omega_0} \tag{5.7-40}$$

式中，θ 为转子磁链位置；L_r 为转子电感；R_r 为转子电阻；F_s 为转子磁链角频率与额定角频率之比；ω_0 为额定电角频率，$\omega_0 = 2\pi \times 50\text{rad/s} = 100\pi\text{rad/s}$（以 50Hz 为例）；$n$ 为转子实际转速与额定转速之比。

以上转子磁链位置计算公式是建立在能够精确地获得电动机转子时间常数的基础之上的。

假设 $i_{T(k+1)} \approx i_{Tk}$，对式(5.7-39)和式(5.7-40)进行离散化处理，并令 $di_d/dt \approx [i_{d(k+1)} - i_{dk}]/T$，可得

$$i_{d(k+1)} = i_{dk} + \frac{TR_r}{L_r}(i_{Mk} - i_{dk}) \tag{5.7-41}$$

$$F_{s(k+1)} = n_{k+1} + \frac{R_r}{L_r\omega_0}\frac{i_{Tk}}{i_{d(k+1)}} \tag{5.7-42}$$

式中，T 为采样周期。

令常数 $K_r = TR_r/L_r$，$K_t = R_r/L_r\omega_0$，则式（5.7-41）和式（5.7-42）变为

$$i_{d(k+1)} = i_{dk} + K_r(i_{Mk} - i_{dk}) \tag{5.7-43}$$

$$F_{s(k+1)} = n_{k+1} + K_t\frac{i_{Tk}}{i_{d(k+1)}} \tag{5.7-44}$$

一旦通过式（5.7-44）计算出 $F_{s(k+1)}$，就可以用下式

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \omega_0 F_{s(k+1)} T \tag{5.7-45}$$

计算转子磁链位置。式（5.7-45）中的第一项是转子磁链转角的累计量，第二项是采样周期 T 时间内转子磁链转角的增量。当采样周期 T 确定之后，$\omega_0 T$ 就是一个常量。如果取 $T = 100\mu s$，则

$$\omega_0 T = 2\pi \times 50 \times 100 \times 10^{-6}\text{rad} = \frac{\pi}{100}\text{rad}$$

现在用一个 16 位数来表示转子磁链位置 θ。因为 θ 的变化范围是 0～2π，对应的 16 位数的变化范围是 0～65536（2^{16}），那么式（5.7-45）的转角增量也要用 16 位数表示。下面给出转角增量的 16 位数表示方法。

当在额定转速下（即 $F_s = 1$）工作时，在每个采样周期 T 时间里，转子磁链都转过 π/100rad。这样，要转过 1r（2π）就需要

$$\frac{2\pi}{\pi/100} = 200\text{ 个采样周期}$$

定义一个常数 K，使

$$K = \frac{65536}{200} = 327.68$$

用 K 作为转换系数，当工作在最高转速（$F_s = 1$）时，使转角转过 2π 所累计的 16 位最大值是 65536，因此，式（5.7-45）改写成

$$\theta_{k+1} = \theta_k + KF_{s(k+1)} \tag{5.7-46}$$

当定子电流在 MT 坐标系的分量 i_M 和 i_T 以及电动机的转速 n 已知时，可以通过式（5.7-43）、式（5.7-44）和式（5.7-46）求出转子磁链的位置 θ。

6.3 控制软件

图 5.7-46 所示为采用 DSP 时感应电动机磁场定向矢量控制系统定时器下溢中断子程序框图。

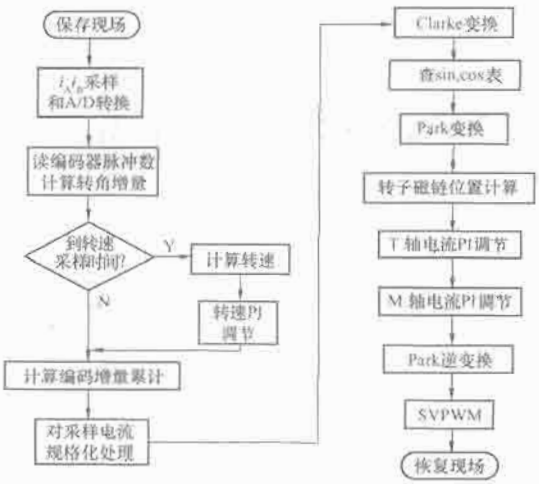


图 5.7-46 磁场定向矢量控制子系统定时器中断子程序框图

7 两相交流伺服电动机控制

7.1 功能和分类

两相交流伺服电动机是一类经典的伺服电动机，它用作控制系统执行元件。由于其控制简单、运行可靠，可以应用于输出不大的自动化装置中。其任务是将输入的电气信号转换为旋转轴上的机械转动信号，以达到预定目的。

电动机定子上布置有空间相差 90°电角度的两相绕组，即励磁绕组和控制绕组。励磁绕组馈以固定的电压 $U_f = U_m \sin\omega t$；控制绕组馈以可变的控制电压 $U_c = U_m \cos\omega t$。当两相绕组产生的磁动势幅值相等、电动机处于对称状态时，在定、转子之间的气隙中产生的合成磁动势是一个圆形旋转磁场，其转速称为同步转速。旋转磁场切割转子导条，产生感应电动势和电流，电流与旋转磁场相互作用，产生转矩，于是转子沿着旋转磁场方向旋转。

两相交流伺服电动机可分为不带任何阻尼元件的普通型两相交流伺服电动机及带阻尼元件的阻尼型两相交流伺服电动机。根据阻尼元件的不同，又可分为黏性阻尼两相交流伺服电动机和惯性阻尼两相交流伺服电动机。两相交流伺服电动机转子与通常笼型感应电动机的相似，但细而长，机械特性近似线性，机电时间常数较小，励磁电流较小，机械强度较高，体积小，用于小功率伺服系统，但在低速运转时不够平滑。普通型交流伺服电动机按其转子的结构，可分为笼型转子和杯形转子（包括非磁性及铁磁性）两种。两相交流伺服电动机还与测速发电机组成伺服－测速机组。

7.2　控制方式

两相交流伺服电动机常用的控制方式有幅值控制、相位控制和幅相控制。

1）幅值控制。如图 5.7-47（a）所示，励磁电压 U_f 为常数，保持控制电压 U_c 与 U_f 的相位差为 90°，改变 U_c 的幅值，即可实现对电动机的控制。$U_c=0$ 时，$n=0$，即电动机停转。

2）相位控制。如图 5.7-47（a）所示，若励磁电压与控制电压幅值保持不变，使两相电压的相位差在 0°～±90°之间变化，即可实现对电动机的控制。当相位差减小时，转矩和转速也相应减小；相位差为 0 时，$n=0$，即电动机停转。

3）幅相控制（也称电容控制）。在励磁绕组中串接一个电容，如图 5.7-47（b）所示，励磁电压为 $U_f=U_1-U_c$，控制电压 U_c 与 U_1 同相位。在改变 U_c 的幅值而对电动机实行控制的同时，由于转子绕组的耦合作用，励磁绕组中电流要发生变化。因此，U_f 与 U_c 之间的幅值及相位都随之改变，故实质上它是幅值和相位复合的控制方式。$U_c=0$ 时，$n=0$。这种控制是利用电容分相，不需复杂的移相装置，成本低廉，是常用的一种控制方式。

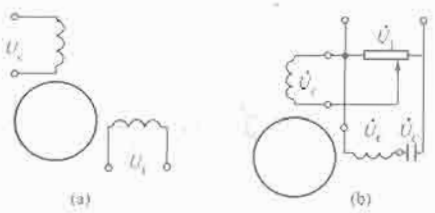


图 5.7-47　两相交流伺服电动机控制方式接线图

（a）幅值控制或相位控制接线图；

（b）幅相控制（电容分相）接线图

三种控制方式比较见表 5.7-5。

表 5.7-5　　三种控制方式比较

控制方式	机械特性非线性度	调节特性非线性度	输出功率	效率	控制功率	电动机温升	线路组成
幅值控制	中	大	中	高	小	低	一般
相位控制	小	中	小	低	大	高	复杂
幅相控制	大	小	大	中	小	中	简单

第8章 步进电动机及驱动系统

1 概述

步进电动机是一种将电脉冲信号转换为相应的角位移或直线位移的机电执行元件。步进电动机由专用电源供给电脉冲，每输入一个电脉冲信号，电动机就移进一步；运动形式是步进式的，所以称为步进电动机，由于输入的是脉冲信号，也称为脉冲电动机；也可以看作是一种特殊运行方式的同步电动机。步进电动机在不需要数模变换的情况下，能直接将数字脉冲信号转换成角位移或直线位移，因此它很适合作为数字控制系统的伺服元件。

1.1 分类

步进电动机按运行原理和结构型式可分为反应式步进电动机、永磁式步进电动机和混合式步进电动机以及直线步进电动机等。表5.8-1为步进电动机的分类。

表5.8-1 步进电动机的分类

电动机名称	代号	含 义
永磁式步进电动机	BY	步、永
混合式（永磁感应子式）步进电动机	BH（BYG）	步、混（步、永、感）
磁阻式（反应式）步进电动机	BC（BF）	步、磁（步、反）
电磁式步进电动机	BD	步、电
盘式永磁步进电动机	BPY	步、盘、永
印制绕组步进电动机	BN	步、印
直线步进电动机	BX	步、线
滚切式步进电动机	BG	步、滚

表5.8-1中，前三种步进电动机最常用。在有些文献及生产厂家的样本中，也将永磁式步进电动机用PM（Permanete Magnet）表示，将反应式步进电动机用VR（Variable Reluctance）表示，将混合式步进电动机用HB（Hybrid）表示。

1.2 特点

步进电动机具有以下特点：

1）用数字信号实现开环控制，控制系统简单、廉价。

2）电动机转过的角度或位移与输入脉冲信号数严格成正比，步距误差无积累，可以组成结构较为简单而又具有一定精度的开环控制系统，也可以通过加装反馈元件组成闭环控制系统。

3）无刷，电动机本体部件少，结构简单，可靠性高。

4）易于起动、停止、正反转及变速，响应性能好。

5）停止时有自锁能力。

6）步距角选择范围大，小步距情况下，通常可以不经减速器直接驱动负载。

7）速度可在相当宽的范围内平滑调节，同时可用一台控制器控制数台步进电动机同步运行。

8）带惯性负载的能力较差，效率低。

9）由于存在失步和共振，因此电动机的加减速方式和方法根据使用状态及驱动电源的不同而复杂化。

10）气隙较小，要求机械加工精度高。

1.3 发展与应用

当前发展与应用最多的当属混合式步进电动机，而混合式电动机向以下方向发展：

1）继续沿着小型化的方向发展。随着电动机本身应用领域的拓宽以及各类整机的不断小型化，要求与之配套的电动机也必须越来越小，在57、42机座号的电动机应用了多年后，机座号沿39、35、30、25向下延伸，最近还研制出外径仅10mm的步进电动机。

2）改圆形电动机为方形电动机。由于电动机采用方形结构，使得转子有可能设计得比圆形大，因而其转矩体积比将大为提高，同样机座号，方形电动机的转矩比圆形的提高30%～40%。

3）对电动机组合设计。即把转子位置传感器、减速齿轮等和电动机本体设计在一起。这样使其能方便地组成一个闭环系统，因而具有更加优越的控制性能。

4）向五相和三相电动机方向发展。目前广泛应用的二相和四相电动机，其振动和噪声较大，而五相和三相电动机具有优势。而就这两种电动机而言，五相电动机的驱动电路比三相电动机复杂，因此三相电动机系统的性能价格比要比五相电动机更好一些。

5）驱动控制上普遍采用细分驱动技术及专用控制芯片，提升了电动机性能。

步进电动机的应用已经渗透到数字控制的各个领域，尤其在数控机械中发挥了很大的作用。随着计算机技术、电力电子技术的发展，以及新型高性能材料的出现，使步进电动机除在办公自动化、家庭自动化和计算机外围设备等领域作为控制和驱动用电动机而被广泛使用外，还在摄影器材、光电组合装置、阀门控制、核反应堆、银行终端、自动绕线机、电子钟表、医疗设备、绘图机、自动记录仪表、遥控装置和航空系统等大量使用。

2 基本原理和结构

2.1 基本工作原理

2.1.1 三相反应式步进电动机工作原理

反应式步进电动机可以做成三相，也可以有四相、五相、六相或更多，其基本工作原理相同。图5.8-1是一台三相反应式步进电动机的横截面图。它的定子上有三对磁极，每一对磁极上绕着一相绕组，绕组通电时，这两个磁极的极性相反。转子铁心及定子极靴上都有小齿，定、转子齿距通常相等。转子铁心上没有绕组。图5.8-1所示的转子齿数为$Z_r=40$，每一个齿距对应的空间角度为$360°/40=9°$。

当某一相绕组通电，例如A相绕组通电时，电动机内

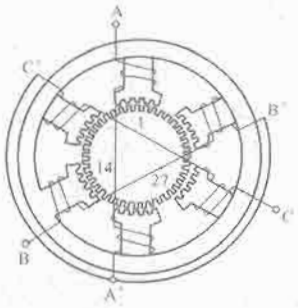


图 5.8-1　三相反应式步进电动机的横截面图

建立以 AA′为轴线的磁场，如图 5.8-2（a）所示。由于定、转子上有齿和槽，所以当定、转子齿的相对位置不同时，磁路的磁导也不同，定、转子齿对齿处的每个极磁导为最大，定、转子齿对槽处的每个极磁导为最小。转子的稳定平衡位置是使通电相磁路的磁导为最大的位置，所以 A 相通电时转子处于 A 相极下定、转子齿对齿的位置，如图 5.8-1 所示。

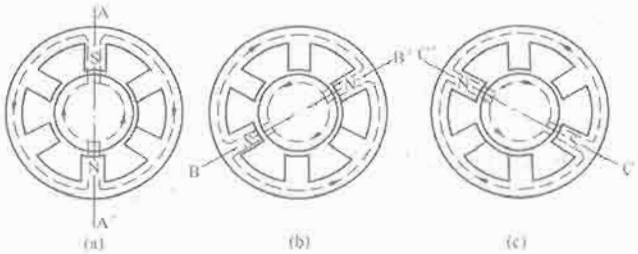


图 5.8-2　一相通电时的磁场情况
（a）A 相通电；（b）B 相通电；（c）C 相通电

B 相绕组的轴线与 A 相绕组轴线的夹角为 120°。中间包含的齿距数为 120°/9=13+1/3，即当 A 相极下定、转子齿对齿时，B 相磁极上定子齿的轴线沿 ABC 方向超前转子齿的轴线 1/3 齿距；C 相磁极上定子齿的轴线，则沿 ABC 方向超前转子齿的轴线 2/3 齿距。

在 A 相断电的同时给 B 相通电，则建立 BB′为轴线的磁场。如图 5.8-2（b）所示，即磁场沿 ABC 方向转过了 120°空间角。此时，转子齿的轴线将力求与 B 相磁极上定子齿的轴线对齐，以达到图 5.8-3 所示的稳定平衡位置。很显然，比起 A 相通电时，即比起图 5.8-1 所示的位置来，转子沿 ABC 方向转过 1/3 齿距。

同理，在 B 相断电的同时给 C 相通电，则建立磁场轴线如图 5.8-2（c）所示的 CC′方向，转子又沿 ABC 方向转过1/3 齿距，以求使 C 相极下定转子齿对齿，如图 5.8-4 所示。

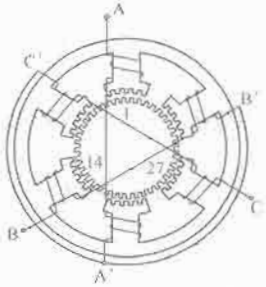


图 5.8-3　B 相通电时，转子的稳定平衡位置（空载）

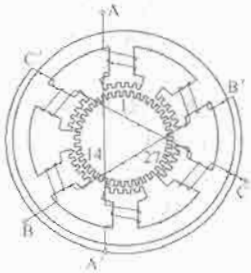


图 5.8-4　C 相通电时，转子的稳定平衡位置（空载）

可见，在连续不断地按 A—B—C—A 的顺序分别给各相绕组通电时，电动机内磁场轴线沿 ABC 方向不断转动，且每改变通电状态一次时，转过的角度为两相磁极轴线间的夹角 120°。而转子则每次转过 1/3 齿距，即 3°空间角。当定子各相轮流通电完成一个循环时，磁场沿 ABC 方向转过 360°空间角，转子沿 ABC 方向转过一个齿距。磁场转速与转子转速的速比等于转子齿数。

同理，如果按 A—C—B—A 的顺序轮流通电，则磁场沿 ACB 方向转动，转子也沿 ACB 方向以较慢的速度转动。也就是说，改变轮流通电的顺序，可以改变电动机的转向。这两种通电方式都是三相单三拍运行方式。

三相反应式步进电动机也可以按三相双三拍（AB—BC—CA—AB）方式运行。双三拍运行方式作用原理与单三拍运行相似，每改变一次通电状态，磁场轴线转过 120°，转子转过 1/3 齿距，但由于通电方式不同，运行性能有些差别。

三相反应式步进电动机还可以采用三相六拍（A—AB—B—BC—C—CA—A）的通电方式，每改变一次通电状态，电动机内磁场的轴线转过 60°，转子转过 1/6 齿距，为三拍时的一半。

从前面的分析可以知道，同一台电动机，可以有不同的通电方式和不同的运行拍数，若用 m_1 表示运行拍数，Z_r 表示转子齿数，则每改变一次通电状态时转子转过角度的平均值称为步距角，用 θ_b 表示，则

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{m_1 Z_r} \tag{5.8-1}$$

从式（5.8-1）中可以看出，拍数及转子齿数不同时，步距角不同，且步距角与拍数和转子齿数成反比。

2.1.2　多相混合式步进电动机工作原理

从电动机励磁方式看，混合式步进电动机是一种具有轴向励磁源和径向励磁源的电动机。从结构上看，它的定、转子上开有很多小的齿槽，这与反应式步进电动机相类似；转子磁路内放置永久磁钢，这与永磁式步进电动机相似。从性能上看，它可以做成像反应式一样的小步距，也具有永磁式的控制功率小的优点。这种电动机常常也被作为低速同步电动机使用。

四相混合式步进电动机结构如图 5.8-5 所示。它的定子结构与反应式步进电动机基本相同，即分成若干极，极上有小齿及控制线圈；转子由环形磁钢及多段铁心组成，环形磁钢在转子的中部，轴向充磁，铁心分别装在磁钢的两端，转子铁心上也有如反应式步进电动机那样的小齿，但磁钢两端铁心上的小齿相互错开半个齿距，定、转子小齿的齿距通常相同。

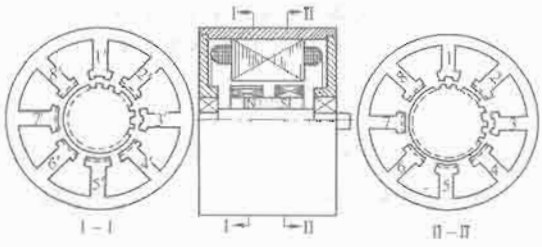


图 5.8-5　四相混合式步进电动机结构示意图

混合式步进电动机工作原理可以与反应式一样进行分析，最大的不同在于其永磁磁钢的存在。

混合式步进电动机可以有不同的相数，常用的有三相、四相、五相、九相和十五相等。它们的工作原理基本相同。

2.1.3　永磁式步进电动机工作原理

永磁式步进电动机的结构原理图如图 5.8-6 所示。定子

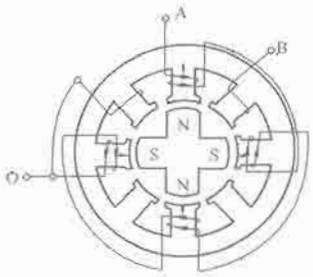


图 5.8-6 永磁步进电动机的结构原理图

上为两相或多相绕线，转子为一对极或多对极的星形永磁体，转子永磁体的极数与每相定子绕组的极数相同。图中画出的是定子具有两相两对极的绕组（AO、BO），转子为两对极的永磁体。从图中不难看出，当定子绕组按 A—B—(—A)—(—B)—A 的顺序轮流通电时，转子将按顺时针方向转动，每改变一次通电状态转过 45°空间角，也就是步距角为 45°。一般说来，在不同的相数和极数时，步距角的值为

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{m_1 p} \tag{5.8-2}$$

用电角度表示的步距角为

$$\theta_e = \frac{2\pi}{m_1} \tag{5.8-3}$$

式中，m_1 为拍数；p 为极对数。

上面所述的通电方式是两相四拍运行，它要求驱动器供给正负脉冲，否则电动机不能运行，这使得驱动器的线路复杂化。若在原两相电动机每一相绕组的位置上绕两套绕组，让它们的绕向相反，就构成了一台四相电动机，这样增加了用铜量，相同功率下电动机的外形尺寸也增大，但简化了对驱动器的要求，驱动器也像反应式步进电动机一样，只要供给正脉冲就行了。

2.2 结构型式

2.2.1 反应式步进电动机

反应式步进电动机亦称磁阻式步进电动机。其定、转子磁路均由软磁材料制成，定子上有多相励磁绕组，利用磁导的变化产生转矩。

反应式步进电动机的相数一般为三、四、五、六相。按绕组排列形式，可分为单段式径向磁路、多段式径向磁路和多段式轴向磁路三种。

相数 m、转子齿数 Z_r、步距角 θ_b 三者之间在对称磁路结构中保持一定的关系，不能任意选取。或者说不同相数的反应式步进电动机，供选用的步距角是有限的。

如果采用人工错位的方法，原则上可以设计出任意步距角的步进电动机。所谓人工错位，是定子冲片的各磁极中心线沿圆周 360°不是等分的，而是根据不同的相数和步距角的要求，依次错开不同的角度。是否需要采用人工错位，可根据式（5.8-4）和式（5.8-5）给出的判据来确定

$$Z_r = 2pk \tag{5.8-4}$$

$$Z_r = 2mpk \pm 2p \tag{5.8-5}$$

式中，Z_r 为转子齿数；p 为每相极对数；k 为正整数（$k = 1, 2, 3, \cdots$）。

反应式步进电动机的相数和齿数能满足式（5.8-4）和式（5.8-5），其各相磁极可沿圆周均匀分布，而不需要人工错位，否则，就要采用人工错位。例如为了提高数控机床的分辨率和精度，在不采用传动齿轮减速的情况下，需要每转千步的步进电动机（即步距角为 0.36°）。对于五相反应式步进电动机，转子齿数 $Z_r = 100$，可设计成每转千步运行。显然，这种情况下不能满足式（5.8-5）的判据，因此必须采用人工错位。

多段式径向磁路反应式步进电动机是由单段式演变而来的。它按相数分段，各相励磁绕组沿轴向布置，如图 5.8-7 所示。由于每相的磁路都各自闭合，所以互感小。运行时电流波形畸变较小，这种结构的步进电动机的定子每相磁极数较多（$2p \geqslant 4$）。电动机的步距精度除了受定、转子冲片精度影响外，还与每段定子轭部上的定位槽精度及装配质量有关。

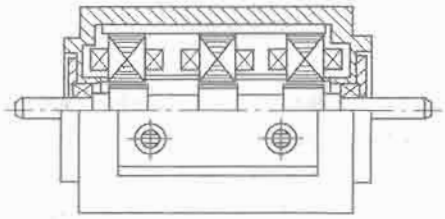


图 5.8-7 径向磁路轴向分段反应式步进电动机

对于偶数相，电动机绕组在进行电流切换时，为了减少各相之间互感的影响，常常设计成每段径向布置成非相邻相绕组的结构型式。这对于选用开关元件有利。如四相步进电动机分成 A—C 相和 B—D 相两段，六相步进电动机分成 A—D 相、B—E 相、C—F 相三段。各相在关断与导通时，同一段内的两相绕组正交布置，由于不存在互感，开关元件不易损坏。

反应式步进电动机的特点是：

1）气隙小。为了提高反应式步进电动机输出转矩，气隙都取得很小，一般是按工艺允许的最小气隙进行设计，最大静转矩在 10N·m 以下的电动机，气隙为 0.03～0.05mm。

2）步距角小。因为反应式步进电动机定、转子是采用软磁材料制成的，没有永磁体，靠磁阻变化产生转矩，在机械加工所能允许的最小齿距的情况下，转子的齿数可以做得很多。

3）励磁电流较大，绕组线径粗，电阻小。

4）电动机的内阻尼较小，当相数较少时，单步运行振荡时间可能很长。

5）断电时没有定位转矩。

2.2.2 永磁式步进电动机

从前面的原理知道，永磁式步进电动机是转子或定子的某一方具有永磁体，另一方是由软磁材料制成，绕组轮流通电建立的磁场与永磁体的恒定磁场相互作用产生转矩，如图 5.8-6 所示。

永磁式步进电动机的特点是：

1）步距角大。一般为 15°、22.5°、30°、45°、90°等。这是因为在永磁体圆周上充磁能开成的磁极数受到极弧尺寸的限制，所以永磁式步进电动机的步距角不能太小，5°以下的永磁式步进电动机很少。

2）相数为偶数。两相和四相较多，其他相数的永磁式步进电动机较少。

3）起动频率较低。负载起动频率通常在 300Hz 以下。但电动机的转速不一定比反应式步进电动机低，有时反而会高。

4）控制功率小。驱动器所使用的电压通常为单一电压，如 24V 或 12V，励磁绕组电流一般也小于 2A，少用或不用限流电阻。

5）内部电磁阻尼较大，单步振荡时间短。

6）断电时电动机具有一定的保持转矩，故有记忆能力，可作定位使用。

2.2.3　混合式步进电动机

混合式步进电动机也称为永磁感应式步进电动机，它与电磁减速式同步电动机结构型式相同。电动机整体结构如图 5.8-8 所示。

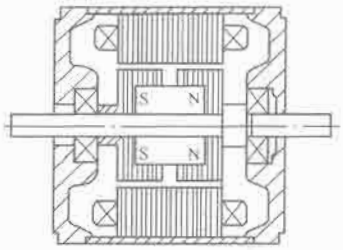


图 5.8-8　混合式步进电动机

混合式步进电动机的转子如图 5.8-9 所示。圆柱形的永磁体在转子的中间，沿轴向充磁，两端分别放置由软磁材料制成的带齿的导磁体，其每段和反应式步进电动机相同，但两段沿圆周错开半个齿距。

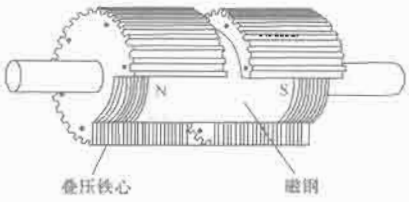


图 5.8-9　混合式步进电动机转子

混合式步进电动机的磁路如图 5.8-10 所示，由永磁体产生的磁通沿轴向穿过转子，然后通过气隙经定子轭部分闭合，如图 5.8-10（a）所示。另外，定子绕组通电后产生的磁通如图 5.8-10（b）所示。其分别在两段按径向闭合，与一般的反应式步进电动机相同。这种电动机就是靠这两种磁通相互作用产生转矩。

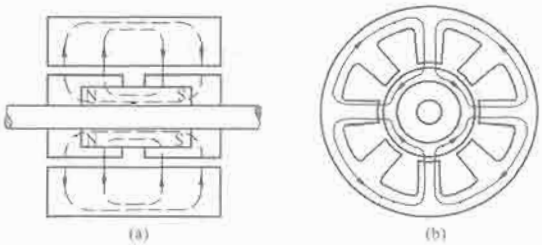


图 5.8-10　混合式步进电动机的磁路
（a）磁钢产生的磁通；（b）励磁绕组产生的磁通

混合式步进电动机是利用定子绕组励磁和永磁体形成的磁场相互作用致使转子转动，以达到磁场磁阻最小位置。转子分为两段，并具有和定子相同的齿槽是为了得到较小的步距。它是充分利用了反应式和永磁式电动机的优点而设计的一种电动机。

混合式步进电动机步距角计算公式与反应式步进电动机相同，即

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{m_1 Z_r} \tag{5.8-6}$$

2.2.4　单相步进电动机

单相步进电动机是一种结构简单，输出功率较小的步进电动机。这种电动机只有一套（相）绕组，可以单方向通电，也可以通过桥式电路两个方向通电。从原理上讲，只要在磁路上采取一些特殊的结构型式，无论反应式还是永磁式都可以做成单相步进电动机。但是由于反应式控制功率大、效率低，所以单相步进电动机很少采用反应式，几乎全为永磁式结构。

单相步进电动机主要用于计时钟表、继电器、计数器等装置中，结构型式很多，如何解决定向转矩是共同的问题。多相步进电动机可以根据相序决定电动机的转向，而单相步进电动机是按二拍通电，很难控制转向。通常采用裂相或不对称磁路的方法产生起动转矩，达到控制转向的目的。按规定转向的方法可分为如下几种类型：

（1）气隙不对称单相步进电动机

这种单相步进电动机磁路不对称，如图 5.8-11 所示。当电动机没有励磁时，只存在永磁体所产生的磁通。转子位置如图 5.8-11 所示。绕组两端接到驱动电源，磁通的方向随电源频率交变，与永磁体作用产生转矩。

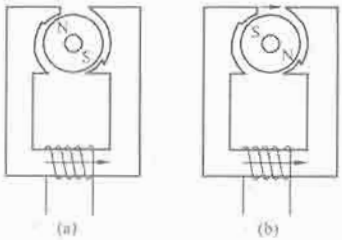


图 5.8-11　气隙不对称单相步进电动机

这种电动机主要用在手表上，一般制成两个磁极，而且不分开。两个磁极间靠狭窄磁桥连接，磁桥饱和后，主磁通在气隙中和转子磁极作用产生转矩。

（2）单相罩极步进电动机

与单相罩极式同步电动机结构完全一样，也有一对极和多对极之分。通以工频交流电的同步电动机的转速 n 与电网频率 f 成正比，与极对数 p 成反比。可按下式计算

$$n = \frac{60f}{p} \tag{5.8-7}$$

单相步进电动机是通以正、负脉冲形式电流（也叫做方波）驱动的同步电动机。利用短路线圈中的感应电流，在罩极部分产生一滞后的磁通。罩极和非罩极两部分磁通在时间和空间上相差某一个相位角，在气隙中形成不完全对称的旋转磁场，产生一种向罩极方向旋转的转矩，如图 5.8-12 所示。

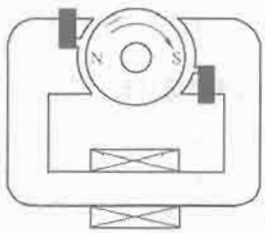


图 5.8-12　罩极式步进电动机

除一对磁极以外，还可以制成多对磁极，如图 5.8-13 所示。这种电动机也称为爪极式步进电动机。一个集中绕组被四片爪极形的极片所包围，每边放两个，中间被短路极隔开，与单对磁极（见图 5.8-12）的短路环起同样的罩极作用。转子是磁滞材料，与磁滞同步电动机的作用原理相同。转向固定，总是向着罩极方向旋转。调节电源的振荡频率即可改变电动机转速。

转子也可以采用永磁材料充成多对磁极或者轴向充磁制成爪极型式。这种电动机的零部件大部分是冲压件，结构简单，成本低。

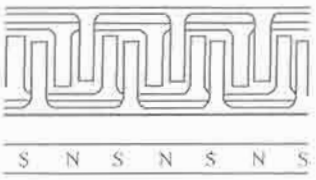


图 5.8-13 多极罩极式步进电动机展开图

3 特性

3.1 步进电动机的单步运行

单步运行状态是指步进电动机在单相或多相通电状态下，仅改变一次通电状态时的运行方式，或输入脉冲频率非常低，以至加第二脉冲之前，前一步已经走完，转子运行已经停止的运行状态。

仍以三相步进电动机为例。假设矩角特性为正弦形，失调角 θ_e 是 A 相定子齿轴线与转子齿轴线之间的夹角。A 相通电时的矩角特性如图 5.8-14 曲线 A 所示。图中，$\theta_e=0$ 的点是对应 A 相定子齿轴线与转子齿轴线相重合时的转子位置，称为平衡位置。当电动机处于理想空载即不带任何负载时，转子停在 $\theta_e=0$ 的位置上。如果此时送入一个控制脉冲，切换为 B 相绕组通电，矩角特性就移动一个步距角 θ_{st}（等于 120°），跃变为曲线 B，$\theta_e=120°$就成为新的平衡位置。但切换的瞬时转子还处于 $\theta_e=0$ 的位置，对应 $\theta_e=0$ 的电磁转矩已由 $T=0$ 突变为 $T=T_{max}\sin120°$（对应图中 a 点的转矩）；电动机在电磁转矩作用下将向新的初始平衡位置移动，直至 $\theta_e=120°$为止。这样，电动机从 $\theta_e=0$ 到 $\theta_e=120°$步进了一步（一个步距角）。如果不断送入控制脉冲，使绕组按照 A—B—C—A……顺序不断换接，电动机就不断地一步一步转动，每走一步转过一个步距角，这就是步进电动机作单步运行的情况。

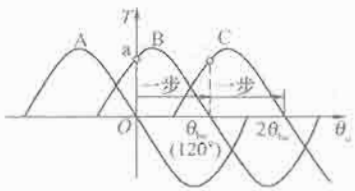


图 5.8-14 空载时步进电动机的单步运行

3.2 步进电动机的连续脉冲运行及运行矩频特性

随着外加脉冲频率的提高，步进电动机进入连续转动状态。在运行过程中具有良好的动态性能是保证控制系统可靠工作的前提。例如，在控制系统的控制下，步进电动机经常作起动、制动、正转、反转等动作，并在各种频率下（对应于各种转速）运行，这就要求电动机的步数与脉冲数严格相等，既不丢步，也不越步，而且转子的运动应是平稳的。但这些要求常常并不都能满足，例如由于步进电动机的动态性能不好或使用不当，会造成运行中的丢步，这样，由步进电动机的“步进”所保证的系统精度就失去了意义。此外，当提高使用频率时，步进电动机的快速性也是动态性能的重要内容之一。

步进电动机作单步运行时的最大允许负载转矩为 T_q，但当控制脉冲频率逐步增加，电动机转速逐步升高时，步进电动机所能带动的最大负载转矩值将逐步下降。这就是说，电动机连续转动时产生的最大输出转矩 T 是随着脉冲频率 f 的升高而减少的。T 与 f 两者间的关系曲线称为步进电动机运行矩频特性，它是一条如图 5.8-15 所示的下降曲线。

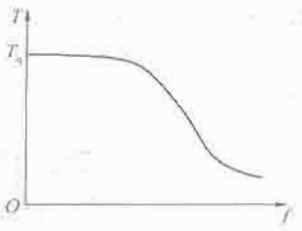


图 5.8-15 运行矩频特性

为什么频率增高以后步进电动机的负载能力要下降呢？一个主要原因就是定子绕组电感的影响。因为步进电动机每相绕组是一个电感线圈，它具有一定的电感 L，而电感有延缓电流变化的特性。当输入脉冲频率比较低时，每相绕组通电和断电的周期比较长，电流的波形接近于理想的矩形波。这时，通电时间内电流的平均值最大；当频率升高后，周期缩短，电流的波形就和理想的矩形波有较大的差别；当频率进一步升高，周期进一步缩短时，电流的波形将接近于三角形波，幅值也降低，因而电流的平均值大大减小。由于转矩近似地与电流二次方成正比。这样，频率越高，绕组中的平均电流越小，电动机产生的平均转矩大大下降，负载能力也就大大下降了。

另外，随着频率上升，转子转速升高，在定子绕组中产生的附加旋转电动势使电动机受到更大的阻尼转矩，电动机铁心中的涡流损耗也将很快增加。这些都是使步进电动机输出功率和输出转矩下降的因素。所以，输入脉冲频率增高后，步进电动机的负载能力逐渐下降，到某一频率以后，步进电动机已带不动任何负载，只要受到很小的扰动，就会振荡、失步以至停转。

3.3 步进电动机的起动矩频特性和起动惯频特性

若步进电动机原来静止于某一平衡位置上，当一定频率的控制脉冲送入时，它就开始转动，但其转速不是一下子就能达到稳定数值的，有一暂态过程，这就是起动过程。

在一定负载转矩下、电动机正常起动时（不丢步、不失步）所能加的最高控制频率称为起动频率或突跳频率，这也是衡量步进电动机快速性能的重要技术指标。显然，起动频率要比连续运行频率低得多。

当电动机带着一定的负载转矩起动时，作用在其转子上的加速转矩为电磁转矩与负载转矩之差，负载转矩越大，加速转矩就越小，它就不易转起来。只有当每步有较长的加速时间（即较低的脉冲频率）时，它才可能起动。所以，随着负载的增加，其起动频率是下降的。起动频率 f_q 随负载转矩 T_L 下降的关系称为起动矩频特性，如图 5.8-16（a）所示。

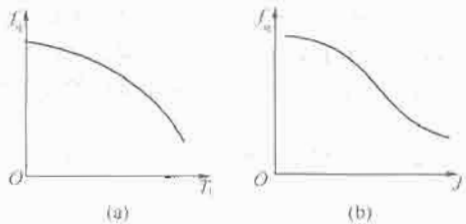


图 5.8-16 起动时的矩频和惯频特性
（a）起动矩频特性；（b）起动惯频特性

另外，随着电动机转动部分惯量的增大，在一定的脉冲周期内，转子速度增加不大，因而难于趋向平衡位置。而要电动机起动，也需要较长的脉冲周期使其加速，即要求降低脉冲频率。所以，随着电动机轴上转动惯量的增加，起动频

率也是下降的。起动频率随转动惯量下降的关系称之为起动惯频特性，如图 5.8-16（b）所示。

从上述不难看出，若要提高起动频率，主要可以从下面三方面考虑：①提高电动机的转矩；②减小电动机和负载的惯量；③增加电动机运行的拍数，使矩角特性移动速度减慢。

4　主要技术指标和参数

步进电动机只有在一定的条件下，才能产生所需要的性能指标。建立输入、输出特性是制造、测试和应用的依据。同一台电动机当使用场合或测试条件改变时，性能将会千差万别。离开具体参数和测试条件，性能指标是没有意义的。步进电动机的主要参数和性能指标如下。

4.1　主要参数

1）额定电压 U_N。指并联在步进电动机各相绕组主回路上的直流电源电压，要求电压纹波系数不大于 5%。当采用高低压供电方式时，额定电压除了电压 U_{Nh} 外还有低压 U_{Nl}。按国家标准 GB10402 规定，优先采用电压等级是：

单电压驱动（V）：6，9，12，24，27，48，60，80，110。

双电压驱动（V）：60/6，60/12，80/6，80/12，110/12。

2）额定电流 I_N。在额定电压 U_N 或 U_{Nl} 作用下，电动机保持静止状态，即环形分配器不工作，按允许的最多相数同时通电，各相直通的静态直流电流即为额定电流。额定电流通常称为静态相电流，简称静态电流。

3）电阻 R。折算到 25℃时的各相绕组的直流电阻。一般磁阻式步进电动机的直流电阻很小，而永磁式步进电动机的电阻较大。各相绕组电阻的不平衡量应不大于 5%。

4）步距角。步距角是指在不带任何减速装置的情况下，对应于每个脉冲信号，步进电动机空载时所转过的机械角位移。由于制造工艺中的各种因素，造成电动机实际转过的步距角可能大于或小于理论步距角值，从而产生了步距角误差。

5）电感。步进电动机是一种由铁磁性材料构成的电磁元件，具有非线性的参数。其电感存在着两种型式，即平均电感和增量电感。步进电动机一般都处于磁饱和状态下工作，其电感值的大小与电流值、转子位置等有关。

6）转子转动惯量。空载时使电动机产生单位角加速度时所需要的转矩。它仅与转子的结构、材料、外形尺寸有关。有些功率较大的步进电动机为减小转子转动惯量，转子冲片采用挖空结构，从而可以提高电动机空载时的加速性能。

4.2　主要性能指标

1）最大静转矩。也叫保持转矩，是在额定静态电流下施加在已通电的步进电动机转轴上而不产生连续旋转的最大转矩。按同时通电相数的多少，最大静转矩可分为单相、两相、三相等最大静转矩。但不能错误地认为通电相数越多，合成转矩越大。由于转矩受电源参数及电流大小的影响，会出现通电相数少时的转矩反而比通电相数多时的大。步进电动机的转矩和转速变化范围较宽，又受驱动电源的影响，很难用功率来表示步进电动机的力能指标，而只给出最大静转矩值。

2）步距精度。步距精度可以采用两种不同的误差值来表示。

第 1 种误差称为定位误差，其定义为步进电动机从任何一步算起，在 1 周（360°）范围内，实际转过的位置与理论上应该转到的位置之差。该误差有正负之分，正负误差最大值的绝对值之和的一半称为定位误差。

例如，电机转过 N 步，理论位置应为

$$\theta_n = N\theta_b \tag{5.8-8}$$

而电动机实际转过的角度为 a_i，那么定位误差可用下式计算

$$\Delta\theta_i = a_i - N\theta_b \tag{5.8-9}$$

求出每步的定位误差后，再求正、负最大的绝对值之和，将此和被 2 除，即为其定位误差。

第 2 种误差称为步距角误差，其定义为步进电动机每步转过的角位移与理论步距角值之差。当步进电动机转过 1 周后，同样先求出每一步的步距角误差，也必然会有最大的正误差和最大的负误差。其绝对值之和被 2 除，所得值即为步距角误差。

3）静态温升。指电动机静止不动时，按规定的运行方式中最多的相数通以额定静态电流，达到稳定的热平衡状态时的温升。步进电动机是一种效率较低的机电能量转换器件，应该允许其长时间在静止不动的状态下通以额定电流。温升的最高限度由绝缘等级决定。

4）动态温升。电动机在某一频率下空载运行，按规定的运行时间进行工作，运行时间结束后，电动机所达到的温升称为动态温升。和静态温升不同，静态温升仅由绕组的铜损耗决定，而动态温升除了铜损耗外，铁损耗也影响动态温升。随着频率的增加，铁损耗增加很快。根据设计参数选择的差异，有的步进电动机静态温升比动态温升高，相反也有动态温升比静态温升高的步进电动机。调整设计参数可以改变静态温升与动态温升的比值。用户都希望能得到一条如图 5.8-17 那样的动态温升曲线。这条动态温升曲线通过试验可以获得。

5）转矩特性。如图 5.8-18 所示，它表示最大静转矩和单相通电时励磁电流的关系。随着电流的增加，开始时，静转矩随电流变化线性增加，当电流增加到一定数值时，转矩便缓慢地增加呈现饱和趋势，继而不再增加。

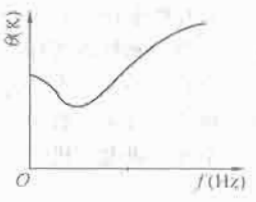


图 5.8-17　动态温升曲线

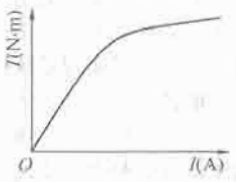


图 5.8-18　转矩特性

6）起动矩频特性。步进电动机接收到某一串连续脉冲信号，输出转轴上加以一定的摩擦负载转矩，突然起动而牵入到同步，起动频率与负载转矩的关系称为起动矩频特性［见图 5.8-16（a）］，随着负载转矩的增加，起动频率将下降。

7）运行矩频特性。电动机起动后，再缓慢地增加脉冲信号的频率，这时虽然已超过起动频率，但电动机仍能不丢步地正常运行。在负载惯量及其他条件不变情况下，仍能正常运行的频率叫做运行频率，其与负载转矩的关系叫做运行矩频特性。如果负载再继续增加，电动机将会失步。如图 5.8-15 所示，运行频率随负载转矩的增加而下降，运行矩频特性高于起动矩频特性，而且运行频率与驱动电源参数、升频方式有关。

8）起动惯频特性。起动频率与负载惯量的关系称为起动惯频特性［见图 5.8-16（b）］。起动频率在负载转矩及其他条件不变的情况下，随着负载惯量的增加而下降。

9）升降频时间。从矩频特性可知，电动机随着运行频率增加，输出转矩减小，有时下降很多，给使用带来困难。样本上标出的最高运行频率，不能全面代表电动机的快速响应指标。一般说来，如果很缓慢地增加频率，也就是升频规律合适，那么电动机能够在很高的频率下空载运行。电动机从起动到最高运行频率中间要经过一个较长的加速阶段，如果时间过长将影响电动机的平均速度。加速时间随负载惯量的增大而变长，当负载惯量超过转子惯量 1.5 倍时，加速时间将明显变长。这对快速工作系统是不利的，因此随着负载惯量的变化应调整升降频时间。电动机从起动到最高运行频率或从最高运行频率降到起动频率所需的时间，叫做升降频时间。

步进电动机主要特性与参数的关系如图 5.8-19 所示。

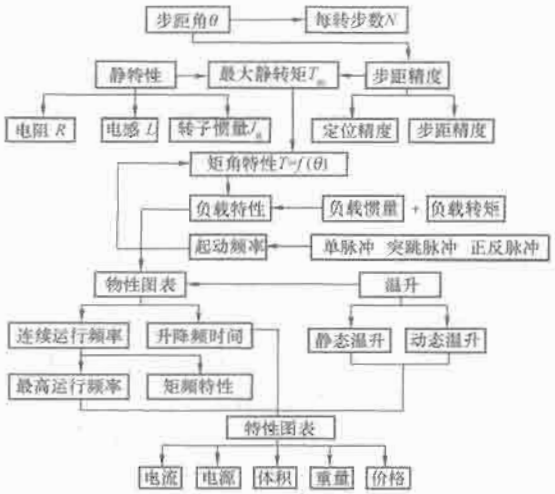


图 5.8-19 步进电动机主要特性与参数关系

5 相关技术标准和测试技术

步进电动机技术标准主要有 GJB 2441—1995《步进电动机通用规范》和 GB/T 10402—1989《磁阻式步进电动机通用技术条件》。

如上所述，步进电动机各种参数和性能指标是比较复杂的，在产品样本中仅给出主要的几种参数和性能指标。在许多情况下，为了实现系统设计目标及有关质量检查，还需要进行其他试验。因此，无论是为了解产品目录的数据如何获得，还是为了自己独立进行试验，掌握步进电动机参数及特性的测试方法是有必要的。

5.1 步距角的测定

步距角的测定可以直接采用读数显微镜、光电编码器等精密测角设备，测出每个脉冲转过的角度。由于步进电动机接收一个脉冲信号，就要相应地转过一定的角度，当接收了 $N_r=360°/\theta_b$ 个脉冲时，电动机即旋转了 1 周。所以，在检查试验中也可以采用预置脉冲数 N_r 的方法核对每转步数，间接检查步距角是否正确。其方法是：在转子的起始位置做好标记，经过 N_r 个脉冲后，转子应仍回到初始位置。否则，需检查电动机的接线和运行方式，核对步距角值。

5.2 矩角特性及最大静转矩测量

矩角特性是电动机最基本特性，它与驱动电源无关，测试时只要有一容量足够大、电压可调的直流电源，能保证励磁绕组达到额定电流即可。测绘矩角特性必须测出不同转子位置的静转矩。

测量步进电动机转角设备可以采用读数显微镜、光栅和分度头等，测角设备的分辨率要求不高，只要是步进电动机分辨率的 1/10 就可以。静转矩可以用各种转矩仪来测量，例如，磁粉测功器、应变仪、具有适当夹紧装置的转矩扳手、滑轮绳索吊砝码以及转矩杆（转矩臂）和弹簧秤等。

根据矩角特性，可以很方便地找到最大静转矩值 T_k 及其所对应的角度 θ_k。由于矩角特性测量较麻烦，而且国标也未有规定，一般厂家都不给出此项性能指标，但是最大静转矩必须测量。其方法为：在额定供电状态下，电动机锁住，测出一个分配周期内任何一个分配状态下的最大静转矩。按此规定，测定转子静转矩是比较方便的，因为无需测定最大静转矩 T_k 对应的角度 θ_k，不需要测角设备，仅要一个直流电源及简易的测量静转矩设备即可。

试验时，根据步进电动机额定工作状态分为单相、两相、三相，按额定电流供给电动机绕组。在输出轴上安装滑轮或测转矩杆，以电动机轴为支点，缓慢增加负载（吊砝码或用弹簧秤拉）。当电动机突然转动的瞬间，跨过了一个或几个步距，此时的负载转矩即为该种状态的最大静转矩。由于测试时存在分散性以及不同位置的静态转矩也可能出现差别，因此每种状态应分别测出转子在三个不同位置时的静转矩，然后再取测试中的最小值作为最大静转矩。

5.3 步距精度的测量

步进电动机的步距精度和其他性能指标有着密切关系，因此不仅位置控制系统，而且其他系统也同样都把精度看作是一项重要指标。按精度的定义可分为定位精度和步距角精度两种，以下分别介绍它们的测试方法。

（1）定位精度

将电动机的输出轴与一个较高分辨率的光学增量编码器连接，然后使编码器输出的脉冲信号送到可逆计数器或用步距精度测试仪来测量定位精度。例如一台步距角为 15°的四相反应式步进电动机，其转轴连接一个每转产生 36000 脉冲信号的编码器，每步 15°即对应 1500 个脉冲信号。

试验时，电动机在额定供电状态下，先使步进电动机锁住不动，计数器清零，步进电动机按单脉冲方式一步一步地转动，旋转 1 周理论位置应为 1500，3000，4500，…，36000 等，即 1500 的整数倍。实际位置与 1500 整倍数之差即为定位精度。

（2）步距精度

与定位精度的测量方法不同之处在于，每走一步之前，计数器必须清零。每步实际转过的角度所对应的脉冲数与 1500 之差即为步距精度。由试验可知，无论定位精度或步距精度，它们均在一周 360°范围内，按运行状态数不同呈周期性变化。

定位精度表示步进电动机转子在 1 周 360°内停止在某一位置时的精度。若安装精度较高，摩擦转矩也不大时，转过 360°后仍将回到起始点。

可以由相邻两步的定位精度的代数和求出步距精度。但按步距精度求定位精度却不太方便，需对各步进行累计运算才行。一般采用定位精度表示一台步进电动机的精度即可，而没有必要同时给出定位精度和步距精度。

5.4 起动矩频特性测量

电动机在额定供电状态，采用预置脉冲数或其他能检查

失步的方法，按选定的负载转矩先加载，然后突然起动。在起动频率范围内，在每个测定点按正反两个转向各起停3～5次，电动机应无失步现象。值得指出的是应克服电动机转轴和负载连接时的机械间隙，最好做到刚性连接。加载时用砝码或其他能产生摩擦转矩的方式，电动机应在不同的几个位置上锁住，分别进行测量，然后以突跳的脉冲频率起动，不应失步，测出不同频率下的起动转矩。当负载为零时，即为空载起动频率。一般单独提起动转矩是不确切的，应同时指出某个频率下的起动转矩，随着频率的提高，起动转矩将下降。如果负载与电动机输出的轴连接不可靠或存在间隙，这种试验方法就不准确，相当于电动机在空载的情况下已运行了几步，然后负载才加上，失去了真实性。

5.5　运行矩频特性测量

电动机在额定供电状态下，按规定方式在较低频率下空载起动。然后频率逐渐增加，随着控制脉冲频率连续上升，能不失步运行的最高频率即为空载连续运行频率。在做运行矩频特性试验时，先升频到某个频率连续运转，再缓慢地增加负载，加载时不应增加惯量，一般用磁粉测功机、摩擦轮等加载，直至电动机失步，此时就测出了该频率下的负载转矩。依次测定各运行频率下能加的最大负载转矩，即可绘出运行矩频特性。这种加载方式称为先升频后加载。另一种方法为先加载后升频，即先使电动机加上一定的负载转矩，然后按一定规律升频，测出电动机能不失步运行的频率。依次测定各转矩下的不失步运行频率，也可绘出运行矩频特性。从试验结果来看，先加载后升频的性能要偏低，而先升频后加载的性能则偏高。采用不同的连接和不同的加载手段，电动机测试性能指标也将有所区别。这里值得特别强调的是电动机运行矩频特性与驱动电源依赖性很大，不同电源测得的矩频特性相差很多，因此绘制矩频性时一定要标出电源条件。

5.6　起动惯频特性测量

测量惯频特性需在电动机轴上牢固地安装具有一定惯量的纯惯量负载。电动机在额定供电状态锁定，采用预置脉冲数或其他能检查失步的方法，电动机带纯惯性负载突然起动，测出不同负载惯量下不失步的起动频率。测试时应注意电动机输出轴与惯性负载的连接尽量避免间隙。为防止测试中引起的误差，试验时，应测出转子在任意三个不同位置上，正反两个转向的起动频率，取其最小值。当电动机空载时，按上述方法测出的起动频率即空载起动频率。

5.7　温升测量

按步进电动机运行状态，温升可分为静态和动态两种状况。

（1）静态温升试验

在额定供电状态下，按分配方式出现最多的相数通以额定的直流电进行温升试验。试验开始前首先应将电动机在室温下放置2h以上，测量绕组的直流电阻，记下室温。电动机安装在规定尺寸的散热板上，按额定供电状态给绕组通电，当机壳表面温升在30min内变化不大于0.5℃时，即认为温度已达到稳定状态。

（2）动态温升试验

在额定供电状态下，将电动机从静止状态起动并升到规定的频率，电动机空载运行30min。然后断电，按照测量静态温升相同的方法测出绕组温升值。此温升就是在规定时间下电动机在某一频率运行的动态温升。步进电动机型式试验中应按此法，对矩频特性规定的几个运行频率，测量其30min空载运行的绕组温升。

6　驱动与控制

6.1　基本原理

步进电动机必须有专用的驱动器才能够运行，而且步进电动机的运行性能与驱动器的驱动方式和性能有着密切的关系，步进电动机的驱动方式有很多种类型，每种类型都有各自的特点和应用场合。同一台步进电动机配置不同的驱动器时有着不同的机械特性，因此，步进电动机的选型实际上是步进电动机和驱动器的选型。

按照绕组流过的电流是单向或者双向的，驱动器可分为单极性驱动和双极性驱动，从步进电动机绕组的利用率来说，双极性比单极性的利用率要高。反应式步进电动机采用单极性驱动，永磁式和混合式步进电动机可采用单极性或双极性驱动方式；按照功率放大电路的结构，可分为恒压驱动、高低压驱动、恒流斩波、调频调压驱动；按照各相绕组的励磁方式可分为整步、半步和微步运行。

步进电动机驱动系统是由控制器、驱动器和步进电动机组成的，原理框图如图5.8-20所示。控制器根据系统控制要求对驱动器发出指令信号，步进电动机驱动器将控制器的指令信号（脉冲和方向信号）转换成为对步进电动机绕组电流的控制，通过控制电动机各相绕组的电流来控制步进电动机的运行。其中脉冲信号的速率决定电动机的转速，脉冲信号的数量决定步进电动机转过的角度，方向信号决定步进电动机的转动方向。

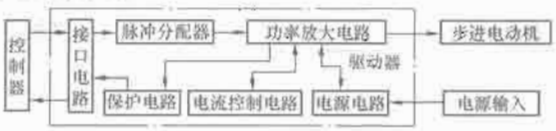


图5.8-20　步进电动机驱动系统的原理框图

驱动器主要包括脉冲分配器、功率放大电路、电流控制电路和辅助的信号接口电路、电源电路、保护电路等几部分。驱动器中的脉冲分配器和功率放大电路是必有的，对于需要对电流进行反馈控制的恒流斩波、微步驱动等驱动方式必须有电流控制电路，而对于恒压驱动方式则不需要电流控制电路。

脉冲分配器的功能是将控制器的串行脉冲指令和方向指令信号按要求输出控制各相绕组导通的相序信号，由于步进电动机的各相绕组轮流循环导通，因此脉冲分配器又称为环形分配器。功率放大电路的功能是将脉冲分配器输出的相序信号进行功率放大，并且转换成对步进电动机绕组电流的控制。对于单极性的步进电动机，功率放大电路可采用单功率管驱动或者双功率管驱动；对于双极性的步进电动机，功率放大电路可采用H桥驱动或者半桥驱动方式。对步进电动机的控制归根结底是对步进电动机各相绕组电流的控制，相电流的控制性能对步进电动机的运行性能有很大影响。对绕组相电流的控制可分为开环和闭环控制两种方式，开环控制方式简单，但具有一定的局限性，只有对电动机运行性能要求不高的情况下采用；闭环控制相对复杂，但是电动机有较好的运行性能。

驱动器还需要具备保护功能，当步进电动机、供电电源或驱动器出现故障时，使驱动器不受损坏，同时将故障信号反馈给控制器。驱动器常用的保护功能有过电流、过电压、欠电压及过热保护等。

6.2 脉冲分配器

脉冲分配器又称为环形分配器，是将控制器的串行脉冲指令和方向指令信号按要求转换成为控制电动机各相绕组轮流通电的相序信号，它是根据步进电动机的相数和要求的通电方式来设计的。脉冲分配器决定了步进电动机的运行方式（即整步运行、半步运行以及每种运行方式下绕组的工作情况）。脉冲分配器的输入信号是脉冲和方向指令，输出是电动机绕组的相序信号，由相序信号决定某时刻电动机绕组的通电情况。

不论何种类型的步进电动机都有两种基本的运行方式：整步运行和半步运行方式。整步运行是指步进电动机以标称的整步距进行运行；半步运行是指步进电动机以标称的整步距的一半运行。另外还有微步运行方式，微步运行是将整步距划分成若干个小步运行，微步运行方式主要是通过对相电流的控制来实现，与整、半步运行的原理是不同的，但是仍然需要脉冲分配器输出的相序信号。

有些脉冲分配器还增加了一些辅助功能，如使能控制、初始状态输出、清零输入以及方式选择等，如图 5.8-21 所示。使能控制是指当该电平信号有效时，脉冲分配器响应输入脉冲和方向信号，输出相序信号；当该电平信号无效时，脉冲分配器不响应输入信号，并且维持原输出状态。初始状态输出是指当脉冲分配器输出为初始状态时，同时输出该信号。脉冲分配器的环分码每循环一次，该脉冲输出一次。清零输入为脉冲信号，作用是使脉冲分配器的输出相序信号全部置为无效电平。方式选择信号是用来选择不同的运行方式，如整步或者半步运行。

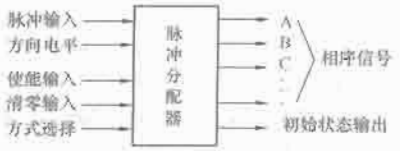


图 5.8-21 脉冲分配器的功能图

脉冲分配器可以由多种方式来完成。一种方式是硬件技术，如可采用通用小规模集成电路搭制而成，如移位寄存器等；还可采用专用芯片，如 CH250、PMM8713/8723/8714 等。其中专用芯片集成度高，可靠性好，但是只能针对某一种步进电动机使用，具有一定的局限性。另一种方式是采用可编程芯片，如由可逆计数器和可编程只读存储器 EPROM、通用可编程逻辑芯片 GAL16V8、GAL22V10 等以及单片机来实现，这几种方法都采用了可编程技术，因此具有更好的通用性。

脉冲分配器输出的相序信号称为状态字。在输入脉冲的触发下，状态字连续不断地变换就可以控制步进电动机连续运行。状态字序列是周期循环的，其周期（一个循环中状态字的个数，又称为拍数）及每个状态字取决于步进电动机的相数和分配方式。由于单相励磁比多相励磁单步响应的振荡要严重，因此实际应用时一般不采用单相励磁方式。脉冲分配器在设计时根据转矩（电流）矢量图，使用真值表、状态图等数字时序电路的设计方法进行设计。设计时应当注意要尽量使合成转矩（电流）为最大值，否则会降低步进电动机的输出转矩。常见步进电动机的励磁方式见表 5.8-2。

表 5.8-2 常见步进电动机的励磁方式

相数	运行方式		励磁顺序	周期	驱动方式
3 相	整步	1—1 分配	A—B—C	3	单极性驱动
		2—2 分配	AB—BC—CA		
	半步	1—2 分配	A—AB—B—BC—C—CA	6	
4 相	整步	1—1 分配	A—B—C—D	4	
		2—2 分配	AB—BC—CD—DA		
	半步	1—2 分配	A—AB—B—BC—C—CD—D—DA	8	
5 相	整步	2—2 分配	AB—BC—CD—DE—EA	5	
		3—3 分配	ABC—BCD—CDE—DEA—EAB		
	半步	2—3 分配	AB—ABC—BC—BCD—CD—CDE—DE—DEA—EA—EAB	10	
2 相	整步	1—1 分配	A—B—$\overline{A}$—$\overline{B}$	4	双极性驱动
		2—2 分配	AB—B$\overline{A}$—$\overline{A}$ $\overline{B}$—$\overline{B}$A		
	半步	1—2 分配	A—AB—B—B$\overline{A}$—$\overline{A}$—$\overline{A}$ $\overline{B}$—$\overline{B}$—$\overline{B}$A	8	
5 相	整步	4—4 分配	$\overline{B}$C $\overline{D}$E—C $\overline{D}$E $\overline{A}$—D E $\overline{A}$B—E $\overline{A}$BC—$\overline{A}$B C $\overline{D}$—B C $\overline{D}$E—C $\overline{D}$E $\overline{A}$—D E $\overline{A}$ $\overline{B}$—E $\overline{A}$ $\overline{B}$C—A $\overline{B}$C $\overline{D}$	10	
		5—5 分配	$\overline{B}$C $\overline{D}$E $\overline{A}$—C $\overline{D}$E $\overline{A}$B—$\overline{D}$E $\overline{A}$B $\overline{C}$—E $\overline{A}$B $\overline{C}$D—$\overline{A}$B C $\overline{D}$E—B C $\overline{D}$E $\overline{A}$—C $\overline{D}$E $\overline{A}$ $\overline{B}$—D E $\overline{A}$ $\overline{B}$C—E $\overline{A}$ $\overline{B}$C $\overline{D}$—A $\overline{B}$C $\overline{D}$E		
	半步	4—5 分配	$\overline{B}$C $\overline{D}$E—$\overline{B}$C $\overline{D}$E $\overline{A}$—C $\overline{D}$E $\overline{A}$—C $\overline{D}$E $\overline{A}$B—$\overline{D}$E $\overline{A}$B—$\overline{D}$E $\overline{A}$B $\overline{C}$—E $\overline{A}$B $\overline{C}$—E $\overline{A}$B $\overline{C}$D—$\overline{A}$B $\overline{C}$D—$\overline{A}$B C $\overline{D}$E—B C $\overline{D}$E—B C $\overline{D}$E $\overline{A}$—C $\overline{D}$E $\overline{A}$—C $\overline{D}$E $\overline{A}$ $\overline{B}$—D E $\overline{A}$ $\overline{B}$—D E $\overline{A}$ $\overline{B}$C—E $\overline{A}$ $\overline{B}$C—E $\overline{A}$ $\overline{B}$C $\overline{D}$—A $\overline{B}$C $\overline{D}$—A $\overline{B}$C $\overline{D}$E	20	
3 相	整步	2—2 分配	$\overline{B}$A—A $\overline{C}$—$\overline{C}$B—B $\overline{A}$—$\overline{A}$C—$\overline{B}$C	6	
		3—3 分配	$\overline{B}$A $\overline{C}$—A $\overline{C}$B—$\overline{C}$B $\overline{A}$—B $\overline{A}$C—$\overline{B}$ $\overline{A}$C—C $\overline{B}$A		
	半步	2—3 分配	$\overline{B}$A—$\overline{B}$A $\overline{C}$—A $\overline{C}$—A $\overline{C}$B—$\overline{C}$B—$\overline{C}$B $\overline{A}$—B $\overline{A}$—B $\overline{A}$C—$\overline{A}$C—$\overline{B}$ $\overline{A}$C—$\overline{B}$C—C $\overline{B}$A	12	

6.3　恒压驱动方式

恒压驱动方式是指步进电动机在工作时绕组加以固定的电压，对电流进行开环控制的驱动方式。

在图 5.8-22 中，步进电动机的电压平衡方程式为

$$U = iR_L + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + E \tag{5.8-10}$$

式中，U 为电源电压；i 为绕组电流；R_L 为绕组的等效电阻；L 为绕组的等效电感；E 为反电动势。

如果忽略反电动势的影响，则绕组充电电流为

$$i_1 = \frac{U}{R_L}(1 - \mathrm{e}^{-t/\tau}) \tag{5.8-11}$$

式中，τ 为绕组回路的电气时间常数，$\tau = L/R_L$。

绕组电流 i_1 的波形是一条指数上升的曲线，当 $t \to \infty$ 时，i_1 达到稳态 $i = U/R_L$。

当相序信号是高电平时，V1 饱和导通，如果忽略其饱和压降，则电源电压全部作用于电动机绕组上。当相序信号是低电平时，三极管 V1 截止，由于绕组等效为电感元件，绕组电流不能突变，因此必须在绕组两端并联一个二极管 VD1，为绕组电流提供一个续流回路。根据式（5.8-10），续流时的电压平衡方程式为 $0 = iR_L + L\mathrm{d}i/\mathrm{d}t + E$，如果忽略反电动势的影响，续流电流 $i_2 = i_1\mathrm{e}^{-t/\tau}$，电流波形为指数下降的曲线。当 $t \to \infty$ 时，i 达到稳态 $i_2 = 0$。

由于绕组导通和续流回路的电气时间常数较大，导致绕组电流上升和下降较慢，高频运行时的平均电流很小，因此输出转矩也很小。这样限制了步进电动机的高频应用。减小时间常数是解决该问题的一种方法。由 $\tau = L/R_L$ 可知，对于确定的步进电动机，绕组的等效电感无法减小，因此只能通过增加回路等效电阻的方法来减小时间常数。如图 5.8-23 所示，绕组回路中串接 R_s 电阻后的时间常数变为 $\tau' = L/(R_L + R_s)$，通过这种方法就减小了绕组电流上升和下降的时间，提高了高频运行时的平均电流。

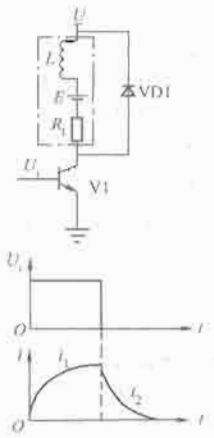


图 5.8-22　恒压单管驱动方式电路原理和波形图

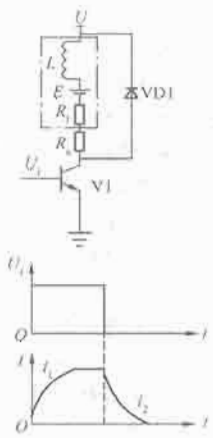


图 5.8-23　恒压单管串电阻驱动方式电路原理和波形图

由于增加了串联电阻 R_s，绕组电流的稳态值变为 $i = U/(R_L + R_s)$，因此必须提高电源电压才能达到电动机的额定电流，增加的电压全部作用于串联电阻 R_s 上，从功率损耗的角度考虑，R_s 的取值不宜过大，一般为绕组电阻 R_L 的 3～5 倍。

恒压驱动方式在串联了电阻 R_s 后，导通和续流回路的电气时间常数大大降低，使电动机的高频运行特性得到改善、同时也增加了回路的阻尼，使电动机的振荡明显减小。但是由于电源的功率大部分都消耗在串联电阻 R_s 上，电阻发热严重，造成系统效率较低。

恒压驱动方式有如下特点：

控制线路简单、可靠；低频运行性能较好，高频运行性能不好；通过串联功率电阻的方法可在一定程度上改善高频运行性能和低频振荡；但是系统效率较低，不能完成锁定电流衰减功能。

6.4　高低压驱动方式

由于恒压驱动方式下步进电动机的高频特性不好，通过串接电阻使电动机高频运行特性有所提高，但是受串联电阻功耗的影响，性能提高有限。要改善电动机的高频运行特性，从根本上说是要提高高频下绕组电流的平均值。根据 $i_1 = U(1 - \mathrm{e}^{-t/\tau})/R_L$，除了减小时间常数的方法，还可以通过提高电源电压来减小电流的上升和下降时间，同样可以达到提高高频下绕组电流平均值的目的。

高低压驱动的设计思想是不论步进电动机工作频率如何，在导通相的前沿用高电压供电以缩短电流上升时间，而在前沿过后用低压来维持绕组电流；关断时绕组能量向高压电源泄放，缩短电流下降时间，从而明显提高电动机的高频运行特性，而且高压电源越高，提高越多。

如图 5.8-24 所示，高低压驱动方式与恒压驱动方式相比，主回路增加了一组高压电源和一只开关管 V2，由 V2 控制高压电源加在绕组上的时间。低压管 V1 的输入信号是脉冲分配器输出的相序信号，其脉宽由脉冲分配器决定，高压管 V2 的输入信号与低压管 V1 的输入信号同时有效，其脉宽小于或等于相序信号，它取决于高压电源的电压值和电动机的电气时间常数，选取原则是在该脉宽时间内，绕组电流达到或稍高于额定值。

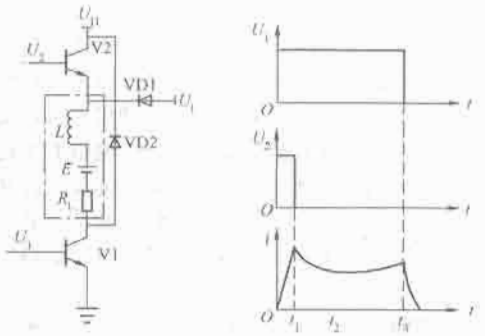


图 5.8-24　高低压驱动方式主电路原理和波形图

高压管的脉冲宽度可采用定时或者定电流方式来确定。定时方式是采用单稳态触发器将相序信号分离出一个同步的窄脉冲作为高压有效控制信号，该脉冲的宽度为单稳态触发器的暂态过程时间 t_1，在这个过程中高压控制管与低压控制管同时导通。一旦 t_1 被确定，则难以控制、调整适应不同的运转频率和不同绕组电感的步进电动机。定电流方式是利用电流反馈，根据电流的设定值来控制高压管的导通时间，电路增加了电流检测电阻和反馈控制环节以及驱动逻辑电路。因此可适应不同的电动机及运行频率，提高驱动能力。

高低压驱动方式对绕组电流的控制分为导通、维持和关断三个阶段。

在导通阶段 t_1 时，相序信号有效，高低压管同时导通，导通回路由 U_H、V2、绕组 L、V1 构成，绕组电流由高压电源提供。电压平衡方程式为

$$U_H = iR + L\frac{di}{dt} + E + U_{T1} + U_{T2} \quad (5.8\text{-}12)$$

在维持阶段 t_2 时，t_1 时间过后，高压管关断，低压管继续导通，维持回路由 U_L、VD1、绕组 L、V1 构成，绕组电流由低压电源提供，使绕组电流维持在额定电流。电压平衡方程式为

$$U_L = iR + L\frac{di}{dt} + E + U_{D1} + U_{T2} \quad (5.8\text{-}13)$$

在关断阶段 t_3 时，相序信号结束，低压管也关断，绕组电流通过 U_L、VD1、绕组 L、VD2、U_H 回路，将能量回馈到高压电源，缩短了泄放时间。对应的电压方程式为

$$U_L + U_{D1} + iR + L\frac{di}{dt} + E + U_{D2} + U_H = 0 \quad (5.8\text{-}14)$$

高低压驱动方式缩短了绕组电流上升和下降时间，使绕组电流在高频运行时也有较大的平均电流，因此能产生较大的电磁转矩，从而得到较好的高频运行特性。但是由于在低频运行时有较大的电流过冲，因此低频运行时电动机的振荡加剧。

高低压驱动方式有如下特点：高频特性好，线路简单，需两组电源，低频时高压电源利用率低，低频振荡加剧。

6.5 恒流斩波驱动方式

高低压驱动方式较恒压驱动方式解决了步进电动机高频输出转矩小的问题，但是由于电动机旋转时产生的反电动势随转速升高而变大，因此电动机高频运行时维持电流有减小的趋势，导致电动机高频运行时的平均电流减小，从而影响了电动机的中、高频输出转矩。因此希望电动机在低、中、高频运行时绕组电流都为额定值，恒流斩波驱动方式可以解决这个问题。

恒流斩波驱动方式的设计思想是引入电流负反馈，反馈控制的主要优点是对反馈环路内的扰动可以进行补偿，使绕组电流始终维持在设定值。对于步进电动机来说，反电动势的变化、电动机自感和互感的变化、绕组电阻的变化都是属于对绕组电流的扰动，而通过对绕组电流的反馈控制都可以进行补偿。这是恒流斩波驱动方式与恒压驱动、高低压驱动方式最根本的区别，因此步进电动机的运行性能得到了很大的提高。

恒流斩波驱动方式是通过实时检测绕组电流来控制功率管的导通和截止，调整绕组上的平均电压，从而使电流维持在额定值。恒流斩波驱动方式下施加在绕组上的电压是断续的，由于电动机绕组是电感性负载，电流不能突变，切断电压后，电流不会立刻降到 0，而是通过续流回路呈指数曲线下降，所以虽然施加在绕组上的电压是断续的，但是电流仍然保持连续。

恒流斩波驱动电流的变化分为导通、续流和泄放三个阶段。恒流斩波驱动的主回路图 5.8-25 由 V1、V2、VD1、VD2 和电动机绕组组成，为了检测绕组电流，在 V1 和地之间串接了 1 只检测电阻 R_s。绕组电流流过电阻时产生电压降，根据欧姆定律，该电压与绕组电流成线性关系，因此将该电压作为绕组电流的反馈量。当反馈电压大于设定电压时，比较器输出控制 V2 截止，绕组电流经过 VD1、绕组、V1 构成的续流回路呈指数曲线下降；当检测电阻上的电压下降到比较器设定的下限时，比较器输出翻转，控制 V2 管重新导通，绕组电流重新上升。这样绕组电流在一个相序信号导通周期内按照设定的电流回差之间波动，实现电流恒定。相序信号结束时，V1 和 V2 同时截止，绕组电流通过 VD1、绕组、VD2 回路将能量回馈到电源，一个周期工作完毕。

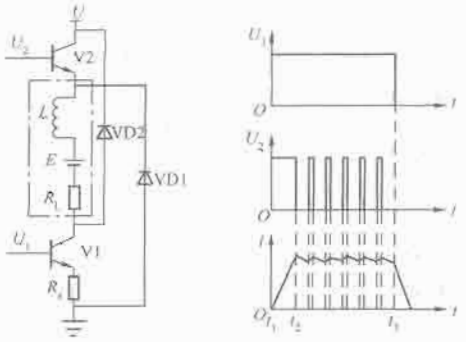


图 5.8-25 恒流斩波驱动方式电路的原理图和波形图

上述恒流斩波驱动中，斩波频率是由电动机的绕组电感、电阻、反电动势以及比较器设定的回差等因素确定的，绕组电流在设定的回差内进行波动，称为滞环控制，又称为自激式恒流斩波电路。这种电路对电流控制较好，但是由于频率不固定，因此会产生音频噪声。他励式恒流斩波电路又称为 PWM 斩波电路，采用固定的频率对电流进行开关控制，如果将斩波频率控制在 20kHz 以上就可以消除音频噪声，而且由于斩波频率较高，电流的波动也很小，因此 PWM 斩波电路应用较多。

恒流斩波驱动的特点如下：高频运行特性好，控制线路较复杂，低频振荡优于高低压驱动方式，电磁干扰较大。

6.6 调频调压驱动方式

为了提高步进电动机的高频响应，在高低压驱动方式和恒流斩波驱动方式下，通过提高电源电压来缩短电流的上升和下降时间。但是，这样会使步进电动机在低频运行时到达新的稳定平衡位置时产生过冲，从而加剧低频振荡。为了减小低频振荡，绕组电流在低频运行时上升和下降较为平缓，而在高频运行时有较陡的上升和下降，以保证有较大的平均电流，才能提高步进电动机的输出转矩。如果步进电动机在低频运行时用较低的电源电压供电，高频运行时用较高的电源供电，使电源电压与脉冲频率成正比，就可以很好地解决这个问题。

调频调压的实现方法有两种：一种是电流开环型调频调压驱动方式；另一种是电流闭环型调频调压驱动方式。

电流开环型升频升压驱动方式的原理框图如图 5.8-26 所示，该驱动方式在驱动器电源输入和驱动主回路之间增加了电压调整器，电压调整器的电压输出与输入脉冲的频率成线性变化。电压调整器可采用开环或闭环控制方式，开环控制的线路简单，闭环控制的输出电压可以不受电网电压和环内参数变化等条件的影响，电压控制性能较好。开环控制方式下对绕组电流的控制是开环的，绕组电流的稳态值完全是由电压调整器的输出和步进电动机的绕组参数来确定，因此电压调整器输出电压与输入脉冲的函数关系要依赖于步进电动机的参数，对于不同型号的步进电动机，需要调整其函数关系，所以这种控制方式对不同的步进电动机适应性不好。

而且电动机在低速运行时绕组上的直流电压很小，使电动机的快速响应性能下降。

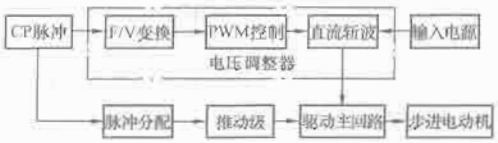


图 5.8-26　电流开环型调频调压驱动原理框图

电流闭环型调频调压方式综合了恒流斩波控制和电流开环型调频调压驱动技术的优点，将电流控制技术与调频调压技术有机结合在一起，其原理框图如图 5.8-27 所示。这种方式在调频调压技术的基础上增加了电流反馈闭环控制，在一定频率范围内使电动机绕组电流随电动机运行速度提高而提高，实现升频升流控制，以改善步进电动机高频运行性能。电流闭环型调频调压驱动方式的电压调整的函数关系是根据对电动机快速性要求和对电动机运行平稳性的综合考虑确定。这种驱动方式由于采用了电流闭环升频升流控制，提高了驱动器的快速性能和对不同步进电动机的适应性。



图 5.8-27　电流闭环型调频调压驱动原理框图

6.7　微步驱动方式

微步驱动又称为细分驱动，是目前步进电动机驱动器中应用最广泛、性能最好的驱动方式。它通过对绕组电流的精确控制，将步进电动机的一个整步距分为几步乃至几百步来完成。不但可以提高步进电动机的分辨率，还可以提高运行时的均匀性，明显减弱低频振荡，增大步进电动机的动态输出转矩。

微步驱动的设计思想源于对步进电动机磁场的控制，理想的旋转磁场应该是圆形的均匀磁场，该磁场是由绕组电流来激励的，在磁路线性的条件下，磁场强度与绕组励磁电流成正比。合成磁场矢量的幅值决定了电动机旋转转矩的大小，相邻两合成磁场矢量之间的夹角大小决定了步距角的大小。前面介绍的驱动方式绕组电流的波动较大，所以形成的磁场波动也较大，微步驱动对绕组电流进行连续精确的控制，绕组电流波动较小，因此得到接近理想的磁场波形，使步进电动机步距均匀、运行平稳。

对于 m 相步进电动机，各相绕组的排布是空间对称的，当通以 m 相对称电流时，就会产生旋转磁动势和磁场，理想的磁场应该是圆形的、均匀的旋转磁场，对 m 相步进电动机，一个步距为 $2\pi/m$ 电角度。若把一个步距变为 n 个微步，可把电流波形在 $2\pi/m$ 电角度内做 n 次等距细分，取各相细分点电流来驱动步进电动机，从而实现一个步距的 n 次细分。

对于两相混合式步进电动机，两相绕组的空间角度互差 90°，细分驱动方式电流矢量图和波形图如图 5.8-28 所示。绕组电流和电磁转矩的计算如下

$$\left.\begin{aligned} i_A &= I_0\cos\theta \\ i_B &= I_0\sin\theta \end{aligned}\right\} \tag{5.8-15}$$

$$\left.\begin{aligned} T_A &= K_0 i_A = K_0 I_0\cos\theta \\ T_B &= K_0 i_B = K_0 I_0\sin\theta \end{aligned}\right\} \tag{5.8-16}$$

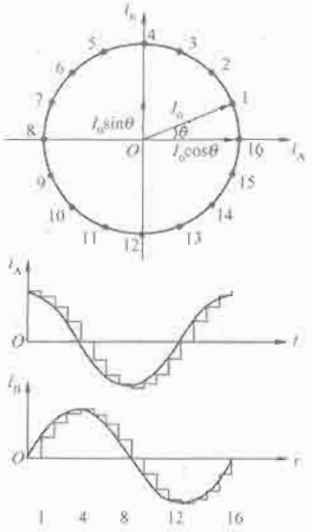


图 5.8-28　两相混合式步进电动机细分驱动方式电流矢量图和波形图

对于三相混合式步进电动机，三相绕组在空间对称分布，角度互差 120°，细分驱动方式电流波形图如图 5.8-29

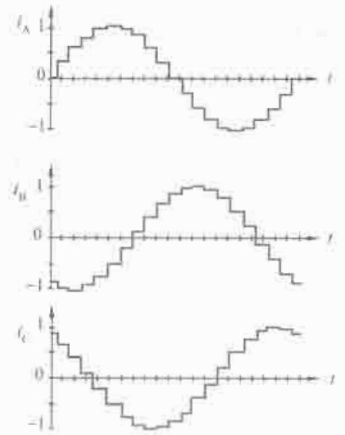


图 5.8-29　三相混合式步进电动机细分驱动方式绕组电流波形图

所示。绕组电流和电磁转矩的计算如下

$$\left.\begin{aligned} i_A &= I_0\sin\theta \\ i_B &= I_0\sin\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right) \\ i_C &= I_0\sin\left(\theta+\frac{4}{3}\pi\right) \end{aligned}\right\} \tag{5.8-17}$$

$$\left.\begin{aligned} T_A &= K_0 i_A = K_0 I_0\sin\theta \\ T_B &= K_0 i_B = K_0 I_0\sin\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right) \\ T_C &= K_0 i_C = K_0 I_0\sin\left(\theta+\frac{4}{3}\pi\right) \end{aligned}\right\} \tag{5.8-18}$$

根据末级功率管的工作状态，步进电动机细分驱动电路可分为放大型和开关型两种。放大型步进电动机细分驱动电路比较简单，电流的控制精度也较高，功率电路产生的电磁干扰很小，但是由于末级功率管工作在放大状态，功放管上的功耗较大，发热严重，因此该驱动电路一般应用于驱动电流较小、控制精度较高、散热条件较好的场合。开关型步进电动机细分驱动电路采用 PWM 控制，功率管工作在开关状

态，因此功率管上的功耗大大降低，该驱动电路可用于输出转矩较大的步进电动机。开关型细分驱动电路的缺点是输出电流有一定的纹波，并且产生的电磁干扰较大。

6.8 步进电动机专用驱动芯片

6.8.1 分类

步进电动机专用驱动芯片从功能上可分为以下几种类型：

1）单独的脉冲分配器集成电路，如 PMM8713、PMM8714、CH250 等。主要用于恒压驱动方式，另外可通过外接功率放大电路和电流控制电路可用于高低压驱动、恒流斩波驱动等方式。

2）包含脉冲分配器和电流控制的集成电路，如 L297、L6506 等。通过外接功率放大电路可用于恒流斩波、微步驱动方式。

3）只包含功率开关驱动或包含电流控制、保护电路的集成电路，如 L298、MTD1110、MTD2001、MTD2003、LMD18200、LMD18245 等。与逻辑控制芯片配合使用，主要用于恒流斩波、微步驱动等驱动方式。

4）包含脉冲分配器、电流控制、功率驱动和保护电路的集成电路，一个芯片就可以完成驱动器的全部功能，如 SAA1042、UCN5804 等。

常用步进电动机驱动集成电路见表 5.8-3。

表 5.8-3 常用步进电动机驱动集成电路

型 号	厂 商	电压(V)	电流(A)	特 点
SLA7024	Allegro	46	1.0	四相译码器/驱动器
SLA7042		46	1.2	四相微步驱动器
SLA7051M		46	2.0	四相译码器/PWM 驱动器
IXMS150	IXYS	12	—	双 PWM，高性能两相微步控制
UC3717/A	UNITRODE	45	1.0	一相，H 桥驱动，微步
UC3770		50	2.0	一相，H 桥驱动，微步
L297	SGS	10	—	控制器，四相，斩波，电流可编程
L6217		18	0.4	两相驱动，微步距，6 位 D/A
L298		50	3.0	双 H 桥，热保护
SAA1027	PHILIPS	18	0.5	两相，L/R 驱动
TA8435H	东芝	40	2.5	两相微步驱动
TD62803P		28	0.4	3 相、4 相，L/R 驱动
TA7774P		12/5	0.1	双电压驱动，两相双 H 桥
TA7289		30	0.7	PWM 斩波，一相，微步距
HA13421	日立	15	0.33	两相驱动
MTD1110	新电元	80	2.0	四相，斩波驱动
MTD1120		80	1.2	四相，斩波驱动
MTD2001		60	1.5	两相，H 桥，斩波驱动
MTD2003		30	1.2	两相，H 桥，斩波驱动
PMM8713	SANYO	18	—	脉冲分配器，3/4 相
PMM8723		5	—	脉冲分配器，4 相
PMM8714		18	—	脉冲分配器，5 相
STK6722H		45	1.5	四相，单极性，斩波
STK6822H		30	1.4	
STK6981H		42	1.5	
STK6982H		42	2.5	
STK6962		30	2.0	
SAA1042	MOTOROLA	18	0.5	两相，L/R
MC3479		18	0.35	两相，L/R

6.8.2 几种常用的步进电动机驱动集成电路

（1）PMM8713/PMM8714 步进电动机脉冲分配器

PMM8713/ PMM8714 是步进电动机控制用的脉冲分配器单片集成电路。

PMM8713 适用于控制三相和四相步进电动机，对于每种步进电动机都有 1 相、2 相、1—2 相励磁方式，共有 6 种励磁方式可供选择。

PMM8714 适用于控制 5 相步进电动机，可选择 2 相、2—3 相、3 相、4 相、4—5 相、5 相共 6 种励磁方式。

这两种芯片的输入方式可选择单脉冲方式（脉冲＋方向）和双脉冲方式（正转脉冲＋反转脉冲），具有正反转控制、初始化复位、原点输出、励磁方式监视和输入脉冲监视等功能。可作单极性和双极性控制，使用时需要外接功率驱动电路才可以驱动步进电动机。

（2）L297 步进电动机控制器和 L298 功率驱动器

L297 是适用于双极性两相或单极性四相步进电动机控制专用集成电路，内含脉冲分配器和电流反馈控制功能。L297 输入正/反转信号、整/半步信号和时钟信号，可输出产生三种相序信号，对应半步、单相励磁整步和两相励磁整步三种不同的运行方式。L297 内部设有两个 PWM 斩波器来控制绕组电流，实现恒流斩波控制。

L298 是与 L297 配合使用的双 H 桥高电压大电流的功率集成电路。最高驱动电压 55V，最大电流 3A，可驱动继电器、直流电动机和步进电动机等电感性负载。如果 L298 内部双 H 桥并联使用，用两片 L298 和一片 L297 配合使用可驱动电流达 3.5A 的两相步进电动机。L297 和 L298 连接图如图 5.8-30 所示。

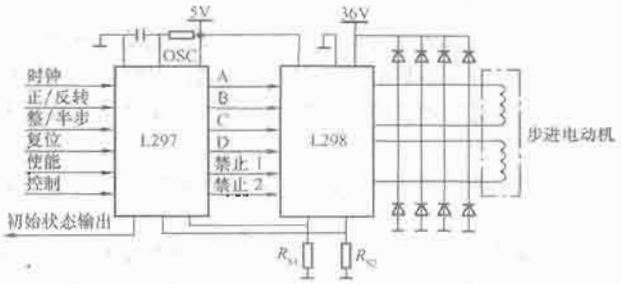


图 5.8-30 L297 和 L298 连接图

（3）TA8435H 两相步进电动机细分驱动器

TA8435H 是单片正弦细分双极性两相步进电动机驱动专用芯片，内含脉冲分配器、电流控制和功率驱动电路，单个芯片就可以完成驱动器的全部功能。该芯片具有以下特点：

1）工作电压范围宽（10～40V）。

2）输出电流可达 1.5A（平均）和 2.5A（峰值）。

3）具有整步、半步、1/4 细分、1/8 细分运行方式可供选择。

4）采用脉宽调制式斩波驱动方式。

5）具有正反转控制功能。

6）复位和使能控制。

7）可选择使用单时钟输入或双时钟输入。

6.9 步进电动机的控制

6.9.1 加减速控制

不论步进电动机作速度控制或者位置控制，如果要求的运行速度小于电动机负载起跳频率，电动机可以按照要求的速度直接起动，运行到终点时，直接停止即可。但是在一般

情况下，步进电动机的空载起跳频率较最高运行频率低得多，而且负载情况下必须考虑负载惯量和负载转矩的因素，步进电动机负载起跳频率就更低了，一般只能达到数百赫兹。由电动机运动方程式 $T_M = T_L + T_{AC} + T_{OTHER}$ 可知，如果电动机以超过负载起跳频率的速度直接起动，因负载惯量而产生的加速转矩 T_{AC} 很大，超过电动机输出的电磁转矩 T_M，电动机在起动时就会产生失步甚至堵转情况，在停止时会发生过冲，导致步进电动机失控。因此在步进电动机的控制中，其运行速度都需要有加速—匀速—减速—低速—停止的过程，其运行曲线如图 5.8-31 所示。

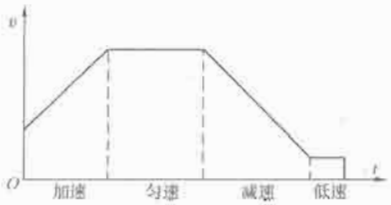


图 5.8-31　步进电动机速度运行曲线

加减速的控制方法主要有两种：一种是按照直线规律加减速；另一种是按照指数规律加减速。按直线规律的加速度为恒定值，因此要求电动机产生的转矩为恒定值。对于步进电动机的特性，在转速不高的情况下，输出转矩可以近似为恒定。但是随着电动机转速的升高，由于反电动势和绕组电感的作用，绕组电流逐渐减少，因此输出转矩将有所下降，按指数规律加减速，加速度是逐渐下降的，接近步进电动机输出转矩随转速变化的规律。

6.9.2　闭环控制

步进电动机把输入的数字脉冲转换成电动机轴的输出角度，每个脉冲使转子转动一个步距角，并依靠电磁力锁定转轴在一定的位置上。一般的步进电动机系统都采用开环控制，由于步进电动机固有低频共振、高频转矩降低而引起的失步和机械结构等因素的影响，都会造成实际位移值偏离指令值。如果没有反馈，就无法知道电动机是否丢步或过步，系统无法对其进行校正和补偿，所以在定位精度、速度范围、低速性能方面都不如传统的闭环控制的伺服电动机。

如果在步进电动机系统中引入位置检测环节并对其进行闭环控制，可从根本上解决步进电动机系统的定位精度问题，使性能大大提高，闭环控制原理框图如图 5.8-32 所示。步进电动机的闭环控制主要有三种控制方法，包括计步（或步校验）、无传感器反电动势检测和有传感器反馈的全伺服控制。



图 5.8-32　步进电动机闭环控制原理框图

步校验是最简单的位置控制，它采用光电编码器等传感器来检测步进电动机实际转过的角度，通过比较指令步数和测量到的转角，以校验步进电动机是否已移动到指定位置。

反电动势检测是一种无传感器检测方法，它采用步进电动机的反电动势信号来测量和控制速度。当速度过低以致反电动势电压低于可检测水平时，将闭环控制切换为开环控制，再完成最终的定位运动。

全伺服控制是指始终使用编码器、旋变或其他反馈装置以更精确控制步进电动机的转子位置。根本的方法就是检测环节将检测到的实际位移反馈给控制器，控制器根据检测到的实际位移和速度状态，来实时调整输入的脉冲数、频率，使步进电动机稳定在正常运行状态，并使实际位置和指令位置一致，从而达到精确定位和稳速的要求。

6.9.3　控制器

在步进电动机控制系统中，除了步进电动机和驱动器外，还需要有控制器。对步进电动机的控制是控制器通过对驱动器的控制来完成的，步进电动机驱动器的接口一般为数字量接口，控制器只需要提供 2 个信号（脉冲信号和方向信号）就可以对步进电动机进行控制。脉冲信号的频率确定电动机的转速，脉冲信号的个数确定电动机转过的转角；方向信号是电平信号，高电平对应电动机的一个旋转方向，低电平对应相反的旋转方向。

根据控制信号的产生方式，控制器可分为硬件电路控制和基于处理器的控制两种方式。硬件电路控制方式是指由硬件电路产生脉冲和方向信号的控制方法，这种方法多用于步进电动机的速度控制；而对于位置控制用这种方法在电路上比较复杂，这种方法在早期的步进电动机应用较多。硬件电路控制方法的优点是输出脉冲频率比较高，缺点是线路复杂、调整不方便，实现位置控制困难等，目前这种方法已经很少使用了。

随着处理器芯片技术的不断发展，步进电动机控制器大部分都采用了基于处理器技术的数字控制方式，采用这种控制方式通过利用处理器的硬件资源和运算功能，采用软件编程来完成对步进电动机的各种运动控制。主要有以下几种方法：

（1）采用单片机、数字信号处理器（DSP）的控制方式

单片机是集成了 CPU、中断控制器、定时器/计数器等功能单元的微处理器，任何一款单片机都可以控制步进电动机的运动。如 Interl 公司的 8031、80196 系列，Zilog 公司的 Z8000 系列，Microchip 公司的 PIC 系列等都可以用于步进电动机的控制。单片机由于是微处理器，其硬件资源有限，运算能力也有限，因此多用在脉冲频率不高（一般 20～30kHz）、不需要复杂运算的场合。使用时要注意在工业现场应用时要充分考虑单片机抗干扰问题。

数字信号处理器，又称为 DSP，是一种具有特殊结构的高性能微处理器。DSP 芯片的内部采用程序和数据分开的哈佛结构，具有专门的硬件乘法器，采用流水线操作，提供特殊的 DSP 指令，减少了指令执行时间，增强处理器的处理能力，可以快速地实现各种数字信号处理算法。其性能较单片机提高很多，输出脉冲频率可以达到上百 kHz，特别适合于电动机的实时控制，有很多运动控制卡也都采用了 DSP 作为控制核心。

（2）采用可编程序控制器 PLC 的控制方式

可编程序控制器 PLC 是面向工厂设计的，它为使用者提供了良好的硬件平台，指令简单、直观，使用者易学易用。对于步进电动机控制，只要在专用指令中输入位移量、速度、加减速时间、方向等参数就可以控制步进电动机的运行，非常简便。使用 PLC 控制步进电动机可以采用两种方法：一种是直接采用具有位置和速度控制功能的 PLC 主机，这种方式一般用于步进电动机的点位控制；另一种是采用专用电动机运动控制模块，这种方式除了可以完成简单的点位控制，还可以完成较为复杂的多轴联动插补功能。

PLC 最大的优点是对工业现场环境的适应性，抗干扰能力比较好。在应用上要注意供电电源的处理和程序的冗余设计。采用 PLC 作控制器，一般需要配有人机界面，常用的有液晶屏＋键盘、触摸式液晶屏、LED 显示＋键盘等。

(3) 采用工业控制计算机+运动控制卡的控制方式

工业控制计算机是专门为工业现场应用而设计的计算机，计算机具有强大的数据处理能力，有很大的存储空间，这些是单片机和 PLC 无法达到的。因此采用工控机可以控制多个步进电动机做更复杂的运动控制。工控机对步进电动机的控制必须有运动控制卡的支持，实际上最终是由运动控制卡来完成对步进电动机的实时。用户在使用运动控制卡时用 VB、VC 等高级语言直接调用运动控制卡的相关函数即可，使用比较方便。

7 设计要点

7.1 主要技术要求

步进电动机主要技术要求是：额定电压、额定电流（静态电流）、步距角、负载转矩、空载起动频率和永磁材料类型。

7.2 基本结构

1) 相数 m。常用的相数是 2、3、4、6 相。

2) 极数。定子总极数是 $2mp$。通常每相极对数 $p=1$；大机座号步进电动机也可以选用 $p\geqslant 2$。对于小机座号的，可以选用每相一个极的结构。

3) 转子齿数 Z_r。转子齿数基本上由步距角的要求所决定。

7.3 转子外径

$$D_R=\sqrt[3]{\frac{0.1T_{jmax}}{C_m\lambda}} \tag{5.8-19}$$

式中，T_{jmax} 为最大静转矩，N·m，$T_{jmax}=T_N/(0.3\sim0.5)$；$C_m$ 为常数，$C_m=0.25\sim0.45$，一般取 0.3；λ 为转子的长细比，$\lambda=l_R/D_R=0.6\sim2$；l_R 为转子铁心长度，cm；D_R 为转子外径，cm。

7.4 定子主要数据和气隙长度

定子主要数据和气隙长度见表 5.8-4。

7.5 冲片设计

设计冲片时，应本着磁路各部分磁压降尽量均匀的原则，参照图 5.8-33 和表 5.8-5 选择定、转子冲片的各部分尺寸。

表 5.8-4 定子主要数据和气隙长度

机壳外径 D_k	定子铁心外径 D_s	定子铁心内径 D_{is}	气隙长度 δ	定子每极齿数 Z_s
$D_k\approx\frac{D_R}{0.4}$	$D_s=D_k-2\Delta_k$①	$D_{is}=D_R+2\delta$	$\delta=\left(\frac{1}{30}\sim\frac{1}{100}\right)t$②	$Z_s=\frac{Z_r}{2mp}-\varepsilon$③ = 整数

① Δ_k 为机壳壁厚。

② t 为齿距；工艺条件许可时，δ 尽量取小值。

③ ε 是一个分数。

表 5.8-5 定、转子冲片尺寸

部 位	t	b_1/t	h_1/t	h_p/D_R	b_p	h_{as}/b_p	h_{aR}	h'_p
关系	$\frac{\pi D_R}{Z_r}$	0.32～0.45 一般取 0.38	0.5	0.15～0.18	$1.5b_tZ_s$	0.5 或 1.5	$\approx h_{as}$	$\frac{D_s-2h_{as}-D_{is}-2h_p}{2}$

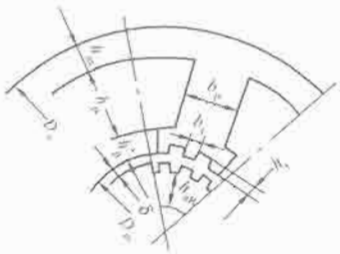


图 5.8-33 定、转子冲片

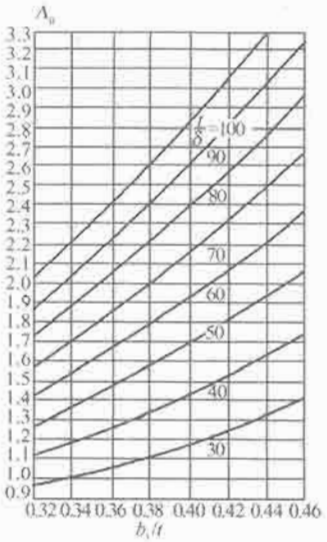


图 5.8-34 $\Lambda_0=f(t/\delta、b_t/t)$

7.6 气隙磁导计算

1) 比磁导 Λ。单位铁心长时定子一个齿距范围内的磁通与气隙磁动势之比。它是齿距 t、齿宽 b_t、齿高 h_t 和气隙长度 δ 的函数，也随失调角 θ 而变化。工程上近似为

$$\Lambda=\Lambda_0+\Lambda_1\cos\theta \tag{5.8-20}$$

式中，Λ_0 为比磁导的恒定分量；Λ_1 为比磁导的基波分量。

2) Λ_0 和 Λ_1。根据 t/δ 和 b_t/t 按图 5.8-34 和图 5.8-35 可求得 Λ_0 和 Λ_1。

7.7 磁通密度和磁动势

步进电动机常用 DR470、DW310 等硅钢片做冲片。其齿磁通密度 B'_t 一般为 1.8～2.2T，定子磁极和定、转子轭磁通密度一般为 1.2～1.6T。大机座号的取上限。各部分磁通密度确定后，其磁动势为：

1) 气隙磁动势

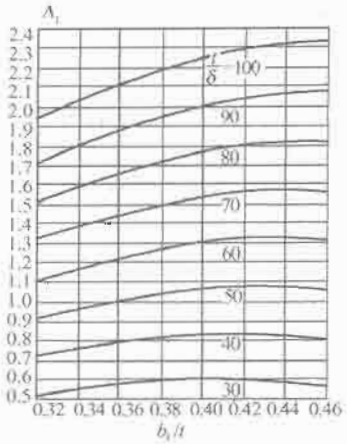


图 5.8-35　$\Lambda_1 = f(t/\delta、b_t/t)$

$$F_\delta = \frac{B'_t b_t K_{Fe}}{\Lambda_0 \times 10^4} \tag{5.8-21}$$

式中，K_{Fe}为铁心叠装系数，一般为 0.9 左右。

2）齿磁动势

$$F_t = 2h_t \xi H_t \tag{5.8-22}$$

式中，ξ 为经验系数，一般取 0.5；H_t 为按 B'_t 及 k_t 查相应硅钢片的齿磁场强度，A/cm，其中 $k_t = \dfrac{t - b_t}{b_t K_{Fe}}$。

3）每极励磁安匝

$$F = F_\delta + F_t + F_p + F_{as} + F_{at} \tag{5.8-23}$$

式中，F_p、F_{as}、F_{at}是定子磁极，定、转子轭部磁压降，其计算方法与一般直流电机相同。

7.8　绕组设计

根据每极励磁安匝 F，权衡电源容量、绕组时间常数 L/R 和工艺性，按导线电流密度 6～12A/mm²（小机座号取上限）选择绕组匝数和线径，并注意核算定子极间窗口槽满率不要超过 0.3。

7.9　最大静转矩验算

$$T_{jmax} = 1.02 F_\delta^2 l_\delta Z_s Z_t \Lambda_1 \tag{5.8-24}$$

8　工艺特点

步进电动机在结构上与其他类型电动机一样，由定子与转子两大部件构成。从步进电动机原理知道，步进电动机工作主要是靠气隙磁阻的变化完成的。因此，不管何种类型的步进电动机，其气隙较普通电动机都要小。针对步进电动机气隙较小这一特点，步进电动机在加工工艺上要注意以下一些问题：

1）由于气隙小，电动机结构采用通常的装配已不能保证小气隙的同心，可采用的结构较常用的为“一刀通”式结构。

2）采用“一刀通”结构，电动机的定子内径与所选轴承的外径尺寸相同。为保证电动机性能可取不同的轴承尺寸作为定子内径尺寸进行电动机电磁方案比较，以便选出合适的方案。

3）对中小机座号步进电动机，由于“一刀通”结构的采用，定子一般采用灌封工艺，其好处是保证定子部分绝缘等级不降低，增强定子部分的散热性，改善电动机运行性能。

4）为保证小气隙情况下电动机径向同心度，电动机各零部件的尺寸公差等级选取较普通电动机提高 1～2 个等级。

5）对混合式步进电动机，转轴材料一定要选用非导磁金属材料（比如不锈钢 1Cr18Ni9Ti），以保证电动机磁路的正确。

6）在结构尺寸允许情况下，机壳尽量取厚一些，以防止加工中及实际安装运行时的机械变形过大，从而保证电动机性能。

7）装配过程中要特别注意将电动机各零部件清理干净，切忌有铁屑等硬质杂物存在于电动机内部，防止电动机运行中出现卡死现象。

8）对有特殊要求（如高低温）的电动机，轴承所加润滑脂或润滑油要选取耐高低温的，否则会出现电动机在低温下的“冻死”现象。

9　选型和应用

9.1　步距角的选择

步进电动机具有固定分辨率，如每转 24 步分辨率的步进电动机，步距角为 15°。不采用齿轮变速或特殊驱动技术（如细分线路），15°步距角的电动机不能完成小于 15°的增量运动或实现分辨率高于每转 24 步的连续运动。当然 15°的增量运动可采用步距角为 5°的电动机走 3 步来完成或 3°步距角电动机走 5 步。采用小步距角分几步来完成一定增量运动的优点是：运行时的过冲量小，振荡不明显，精度高。选用时应权衡系统的精度和速度要求，选择一种合适的标准步距角，如果不符合要求的步距角，可通过变速齿轮折算成标准步距角。应用比较多的步距角为 3°、1.8°、1.5°、0.9°和 0.75°等。

9.2　系统的定位精度

在开环控制系统中，定位精度由如下几部分构成

$$\Delta\theta_t = \Delta\theta_b + \Delta\theta_n + \Delta\theta_D \tag{5.8-25}$$

式中，$\Delta\theta_t$ 为系统定位误差，(°)；$\Delta\theta_b$ 为步进电动机定位误差，(°)；$\Delta\theta_n$ 为传动系统累计误差，(°)；$\Delta\theta_D$ 为摩擦负载引起的死区，(°)。

国内步进电动机的产品样本很少给出定位误差，初选时可取步距误差代替定位误差。传动系统累计误差由传动齿轮、丝杠精度及齿隙决定。把步进电动机的矩角特性看成为正弦曲线时，摩擦负载引起的死区 $\Delta\theta_D$ 可按式（5.8-26）计算。

$$\Delta\theta_D = \frac{m_1\theta}{2\pi}\arcsin\frac{T_f}{T_k} \tag{5.8-26}$$

式中，T_f 为摩擦转矩，N·m；T_k 为最大静转矩，N·m；m_1 为拍数；θ 为步距角（°）。

当负载、频率发生变化或者电动机有振荡时，系统则会产生动态误差。动态误差虽然有时会大于 1 个甚至几个步距角，但只要不超出动稳定区就不会造成失步。定位精度仅决定于静态定位误差，与动态误差无关。动态误差主要由系统的参数，如电感、电阻、转动惯量及阻尼系数决定。

9.3　转矩的选择

步进电动机输出转矩难以用简单的图形或解析式来描述，它与最大静转矩、矩角特性、运行方式、驱动电源的关系极为密切。反应式步进电动机只有当相绕组通电后才有定位转矩，而永磁式步进电动机与混合式步进电动机当不通电时也有定位转矩，选用时应注意其差异。运行时起动转矩总

是小于电动机的最大静转矩。

步进电动机起动矩频特性和运行矩频特性在一定的通电方式和控制条件下代表步进电动机的输出转矩与转速关系。在曲线所限定的范围内，电动机可以起动和运行，超出这个范围电动机就不能正常工作。已知系统的负载转矩 T_L，即可在起动矩频特性上找到相应的起动频率 f_{st}。电动机在低于 f_{st} 的频率下可直接带动 T_L 的负载起动和运行。制造厂家给出的这条曲线是在一定的电源条件下和负载惯量所测得的。当电源参数改变或者负载惯量过大，则起动频率也要相应改变。对于旋转速度要求高的系统，必须采用升降频线路，从起动频率开始逐渐地提高频率。最高运行频率由运行矩频特性决定。起动矩频特性与运行矩频特性两条曲线所夹着的中间区域，作为电动机可连续工作范围。在这个范围内，电动机是先起动，然后逐渐升频达到某一频率而稳定运行。

9.4 阻尼方法的选择

步进电动机运行时的显著缺陷是存在振荡，从而导致非积累的静态误差和动态误差。为了改善运行质量应选择满意的阻尼方法。

1）外部机械阻尼。干摩擦惯性阻尼器如图 5.8-36 所示，这种阻尼器目前国内应用很普遍。安装在电动机轴上的惯性轮 D 可在摩擦圆盘 E 上滑动，通过调节螺母，可以改变弹簧片所产生的轴向压力，达到调整摩擦阻尼的作用。

此外，还有如图 5.8-37 所示的黏滞惯性阻尼器。它由和步进电动机转子刚性连接的框架及装在里面的惯性铁心组成。框架内部空隙填满适当黏度的硅流体，这种硅流体具有黏滞作用，但惯性铁心在框架里可以自由旋转。这种阻尼器对步进电动机来讲是一种具有黏滞摩擦转矩的惯性负载。

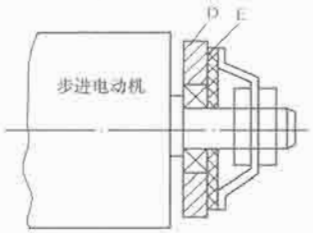


图 5.8-36 干摩擦惯性阻尼器

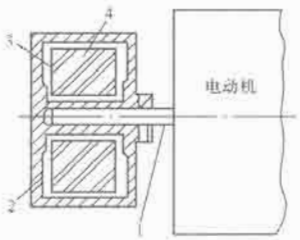


图 5.8-37 黏滞惯性阻尼器

1—电动机转轴；2—框架；3—硅流体；4—转子铁心

2）电子（开关电路）阻尼法。机械阻尼的主要缺点是增加了额外的机械元件，加大了电动机的长度尺寸，同时还影响电动机的快速性能指标。采用电子阻尼方法可以克服这些缺点。电子阻尼就是通过电子开关对电动机励磁绕组进行特殊控制或切换。例如，多相同时励磁、反相励磁及终步延迟等都属于电子阻尼方法。

9.5 效率及成本

步进电动机不是高效率的机电能量转换器件。在步进电动机产品样本资料中很难找到它的效率额定值或效率曲线，这并不是因为效率对步进电动机无关重要。和其他电动机一样，效率高低直接影响能源损耗，影响产品的出厂价格和使用费用。由于步进电动机效率确定比较困难，在步进电动机系统中，驱动电源往往比电动机本身更影响系统效率，也就是说电动机效率优劣很大程度上依赖于驱动电源。用户应从系统成本出发，考虑整个系统效率。

9.6 应用实例

（1）计算机外部设备

这是应用步进电动机数量最多的领域，随着计算机向着高速化、小型化方向的发展，对步进电动机的要求也越来越高。采用步进电动机的外部设备主要有：

1）串行打印机。这种打印机字盘上的铅字数一般为 64、96、128、132 等固定个数。打印的速度为 40 字/s、55 字/s、60 字/s。它属于一种电动打印机，把计算机输出的数据或字符通过铅字一个一个地打印出来。铅字轮盘的型式多种多样，最常见的一种叫做菊花瓣式串行打印机。如果采用直流电动机驱动必须通过位置反馈，组成闭环才能实现准确定位。而步进电动机可以由计算机直接控制，开环也可实现定位控制。步进电动机按预置的脉冲数转过一定角度后，停下来进行打印，然后再起动、旋转、停止、打印等周而复始地进行。在选用步进电动机时，一定要使步距角或每转步数与字盘上的铅字数相匹配。例如：96 个铅字符号的打印机可以选用 3.75°步距角的步进电动机。由于步进电动机一直处于频繁起停工作状态下，因此要求电动机的起动性能好，负载起动频率高，这样才能提高打印机的速度，满足使用要求。

2）XY 绘图仪。图 5.8-38 为 XY 绘图仪系统框图。绘图指令可通过纸带介质输入给计算机，也可以由计算机编程直接输入，通过处理后送入控制器，最后由驱动器使步进电动机旋转。控制器是由插补器、函数发生器和加速度反馈电路组成。插补器的作用是根据计算机给出的指令和数据进行插补运算，输出指令脉冲控制步进电动机旋转。插补器中包括斜率、速度及加速度的积分器以及距离计数器和门控电路等，由这些电路组成的控制器对步进电动机实现优化控制。当然采用细分电路或平滑驱动电路可以提高绘图的图面质量。由于系统的精度提高，走步平稳，减小了线条的抖动量。目前多数采用按正弦规律包络的阶梯波电流供电，提高图面质量。有时也采用加速度反馈电路构成闭环，改善运行状态，消除抖动。



图 5.8-38 XY 绘图仪系统框图

此外，宽行打印机、穿孔机、软盘机等计算机外部设备都大量采用步进电动机作为驱动或定位控制电机。

（2）家用缝纫机

一般家用缝纫机多半是按直线轨迹进行运动，如果采用步进电动机驱动机针左右摆动以及缝料前后送布量的配合，便可缝制出各种复杂的花样。将这些花样数据存储在微型计算机中，应用时会更方便。有时还可以完成钉扣、锁钮扣口等多种缝纫作业。

步进电动机输出轴上装有两个存有花样数据的存储盘，存有机针的摆动量和缝料进给量的数据。存储盘的存储间隙

与电动机的步距角相对应。缝纫花样的形成是通过 3 个步骤实现的。

第 1 步先初始化，接通电源后，电动机带动存储盘旋转，存储盘上开有透光孔，当寻到第 1 个花样位置时，电动机通过减速而停转，作为起始位置。

第 2 步选择花样，按下花样选择按钮，步进电动机励磁并以某一种速度旋转，花样的位置从起始位置算起累计编号并存储在 ROM 中，当计数和 ROM 中编号一致时，花样选择即可完成。

第 3 步花样产生，根据花样的繁简，步进电动机相应进行各种型式的步进运动，如进退不同的步数，往返循环，完成了花样编组目的。

(3) 传真机

传真工作时收、发两端同时进行运转，发送端将整幅原稿分解成一系列图像单元，按顺序通过线路送到收端。图像的分解和合成是靠主扫描一起完成。滚筒相对于光电头或打印系统作旋转运动而形成主扫描，副扫描为沿轴向的水平直线运动，从而完成整页图像的扫描和打印。为了防止图像的倾斜和变形，要求收、发两端的主、副扫描速度必须同步。一般振频稳定度为 10^{-5}～10^{-6}，仅要求步进电动机平均角速度严格同步尚不够，还应保证瞬时速度相等。步进电动机带动滚筒作恒速旋转，可认为是纯惯性负载。而副扫描的步进电动机通过丝杠带动打印头，作直线恒速运动也属于一种惯性负载。

由于运动是连续不断的，在整张图像的传送过程中，不会频繁起停和正、反转。当工作在 720Hz 以上的频率时，电动机无振荡、运行质量较高。以小于 1″/720 的周期送入一个脉冲，同步精度和均匀速度都很高。纯惯性负载可以吸收速度波动，运行平稳均匀。应用时要注意传动齿轮的间隙不能太大，否则会影响运行品质。

(4) 数控机床

数控机床可以把机床工作机构或被加工的零部件动作顺序、运动规律、行程和速度等以数码形式事先记录在易于更换的介质上或直接输入到计算机中。然后经运算控制电路将数码变换为相应的控制信号来控制加工。数控机床的加工过程实质上是一种按最小位移量和规定方向逼近曲线或直线的过程。

数控铣床工作原理示意图如图 5.8-39 所示。事先编好的程序存入到计算机中，直线或圆弧插补器根据寄存器中控制程序所规定的轨迹及所给的数据进行插补运算，向各坐标分配指令脉冲。每发 1 个脉冲，步进电动机拖动工作台直线位移 1 个脉冲当量。两个或 3 个坐标联动就可以加工出控制程序所要求的工件轮廓图形来。

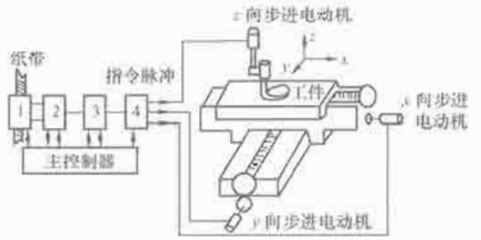


图 5.8-39　数控铣床工作原理图

1—纸带阅读机；2—输入控制器；3—运算器；4—输出控制器

经济型数控机床，尤其是经济型数控车床广泛地采用步进电动机作为进给系统的驱动元件，其实例较多，结构和性能基本相同，仅有两个坐标，比铣床简单，有关资料较多，在此不加论述。

(5) 石英电子手表

指针式石英电子手表采用步进电动机直接驱动手表的时、分、秒针，这种手表的工作原理如图 5.8-40 所示，系统特点如下：

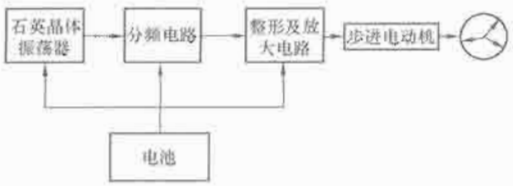


图 5.8-40　指针式石英电子手表原理框图

1) 由于手表体积小，电池容量有限，这就要求各个部件体积小，消耗电能少，近来出现了繁多的结构型式，但总的特点都是采用单相永磁式步进电动机驱动，以达到体积小、耗电少、价格便宜之目的。

2) 为了使单相永磁步进电动机有固定的旋转方向及足够的负载能力，通常采用两种办法，即加辅助磁极（定位极）或者让主磁路不对称。后一种办法用得更多，如“偏心式”、“凹坑式”及“双径式”等，统称不均匀气隙电动机。图 5.8-41 为 DAD-1 型表用步进电动机，其中转子部件是由安装在传动轴齿上的圆片磁钢构成的，此磁钢采用各向异性稀土永磁材料制成，磁极结构为隐极，沿磁钢的径向形成一对磁极。定子部件由铁镍合金板冲压而成，分左右两半装配时连成一体。线圈部分由骨架和励磁线圈组成，线圈和定子片及转子磁钢构成电动机的闭合磁路，定子内圆有一个小凹坑，造成工件气隙不均匀。

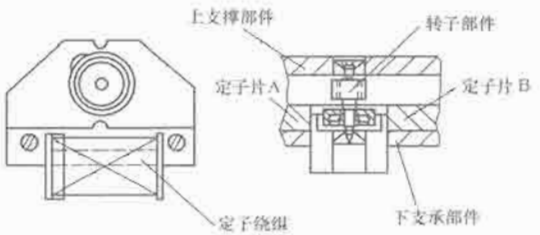


图 5.8-41　DAD-1 型表用步进电动机结构示意图

3) 手表用步进电动机一般多用窄脉冲控制，即从绕组上看，外电压是间隔 1s 的窄脉冲（脉宽为 15.6ms 或 7.8ms）。在电压脉宽的范围内绕组由电源供电，在其余时间内，绕组通过外电路短接，电动机转子带动传动齿轮、指针及日历机构，每一秒钟转子转过一定角度。在下一个脉冲来到以前，转动部分可以达到新的平衡位置上，并完全静止不动。步进电动机运行周期是 1s。

10　典型产品技术数据

(1) 混合式步进电动机典型产品技术数据

BYG 系列混合式步进电动机技术数据见表 5.8-6。

(2) 反应式步进电动机典型产品技术数据

BF 系列反应式步进电动机技术数据见表 5.8-7。

(3) BY 系列永磁式步进电动机典型产品技术数据

BY 系列在国外为 PM 型，其技术数据见表 5.8-8。

(4) 五相混合式步进电动机典型产品技术数据

五相混合式步进电动机技术数据见表 5.8-9。

(5) 三相混合式步进电动机典型产品技术数据

三相混合式步进电动机技术数据见表 5.8-10。

表 5.8-6 BYG 系列混合式步进电动机技术数据

型号	相数	额定电压 (V)	静态电流 (A)	步距角 (°)	保持转矩 (mN·m)	空载起动频率 (Hz)	空载运行频率 (Hz)	步距角误差 (%)	负载起动频率 (mN·m/Hz)	外形尺寸 (mm) 总长	外径	轴径	重量 (kg)
42BYG008	4	32	0.38	1.8	76	1400	5000	±6	50/500	30	42	4.7	0.24
42BYG008G	2	32	0.32	1.8	88	1400	5000	±6	50/500	50	42	4.7	0.24
42BYG012	2	12	0.52	1.8	172	600	900	±6	60/500	57	42	5	0.25
42BYG131-Ⅱ	4	12	0.16	1.8	49	500	550	±6	30/500	57	42	5	0.25
42BYG23	2	12	0.4	1.8	206	600	700	±6	65/500	50	42	5	0.25
57BYG007	4	12	0.3	0.9/1.8	30	650				41	57	6	0.45
57BYG008	4	4.5	8	0.9/1.8	50	1000				51	57	6	0.59
57BYG009	4	2.4	1.3	1.8	60	2600			78/2400	56	57	6	0.59
86BYG001	4	28	2.4	1.8	1200			±10		62	86	9.5	1.6
86BYG002	4	5.5	4.5	0.9/1.8	1080			±10		62	86	9.5	1.6
86BYG003	4	2.5	1.25	0.9/1.8	2000			±10		94	86	9.5	2.6
86BYG004	4	4.5	4.64	0.9/1.8	3000			±10		134	86	9.5	3.8
86BYG017	5	70	1.25	0.36/0.72	1200	2400	3000	±3.5		105	86	9.5	1.5
86BYG018	5	70	1.15	0.36/0.72	2200	1900	30000	±3.5		138	86	9.5	2.5
86BYG019	5	70	28	0.36/0.72	3600	2500	30000	±3.5		171	86	9.5	3.5
110BYG007	5	130	5	0.36/0.72	6800			±3.5	450/5000	194	110	16	7.5
110BYG008	5	130	5	0.36/0.72	10300			±3.5	650/5000	242	110	16	11
110BYG450	4	80/220	6	0.9/1.8	7100			5.4/3.24	5000/3500	194	110	16	7.5
110BYG450A	4	80/220	6	0.9/1.8	10300			5.4/3.24	5500/3500	242	110	16	11

表 5.8-7 BF 系列反应式步进电动机技术数据

型号	相数	额定电压 (V)	静态电流 (A)	步距角 (°)	保持转矩 (N·m)	空载起动频率 (Hz)	空载运行频率 (Hz)	外形尺寸 (mm) 总长	外径	轴径	重量 (kg)
28BF001	3	27	0.8	3/6	0.0176	1800		30	28	3	0.075
36BF003	3	27	1.5	1.5/3	0.078	3100		43	36	4	0.22
45BF003Ⅱ	3	60	2	1.5/3	0.196	3700	12000	82	45	4	0.38
45BF005Ⅱ	3	27	2.5	1.5/3	0.196	3000		53	45	4	0.4
55BF001	3	27	2.5	7.5/15	0.372	750		70	55	6	0.8
55BF004	3	27	3	1.5/3	0.49	2200		60	55	6	0.65
70BF001	5	60	3.5	1.5/3	0.392	4000		88	70	6	1.6
70BF004	4	27	3	0.9/1.8	0.784	2100		63	70	8	1.1
70BF3-3J	3	110	0.4	1.5/3	0.49	1000		102	70	8	1
70BF3-3A	3	60/120	5	1.5/3	0.882	1500	8000	126.5	70	6	1.5
70BF5-3	5	60/120	3.5	1.5/3	0.294	3000	16000	106.5	70	6	1.2
75BF001	3	24	3	1.5/3	0.392	1750		75	75	6	1.1
75BF003	3	30	4	1.5/3	0.882	1250		75	75	8	1.1
75BF004	3	80	5.8	1.5/3	0.49	2500	16000	72	75	6	1.25
90BF001	4	80	7	0.9/1.8	3.92	2000	8000	145	90	9	4.5
90BF002	5	80	7	0.75/1.5	3.92	3800	16000	145	90	9	4.5
90BF003	3	60	5	1.5/3	1.96	1500	8000	125	90	9	4.2
90BF004	5	60	7	0.75/1.5	2.45	4000	16000	118	90	9	3
90BF4-1.8	4	60/12	7	0.9/1.8	2.55	1500		151	90	9	3.5
90BF5-1.5	5	60/12	5	0.75/1.5	1.568	2000	16000	128.5	90	9	3.8
110BF5-1.5	5	60/12	7	0.75/1.5	2.646	1700	16000	161	110	11	4.5
110BF3-1.5	3	40	6	0.75/1.5	7.84	1000		196	110	14	7.5
110BF02	3	80	6	0.75/1.5	7.84	1500	8000	189	110	14	
110BF3	3	80	8	0.75/1.5	10	1300	7000	212	110	11	
110BF5-1.5	5	60/12	7	0.75/1.5	2.646	1700	16000	161	110	11	4.5
130BF001	5	80/12	10	0.75/1.5	9.31	3000	16000	170	130	14	9.2
130BF3-1.5	3	110/12	10	0.75/1.5	1.372	1200	9000	263	130	18	
130BF5-1.5/0.75	5	110/12	10	0.75/1.5	12.74	2000	8000	179.5	130	16	
150BF002	5	80/12	12	0.75/1.5	13.72	2800	8000	155	150	18	14
150BF003	5	80/12	13	0.75/1.5	15.68	2600	8000	178	150	18	16.5
150BF01	5	80/12	13	0.75/1.5	15.68	2000	12000	227	150	12	14.5
160BF5B-1.5/0.75	5	80/12	13	0.75/1.5	20.6	2000	8000	187.5	160	12	
160BF5C-1.5/0.75	5	110/12	13	0.75/1.5	16.17	2000	10000	222.5	160	12	
200BF001	5	24	4	20′	14.7	1300		93	200	28	16

表 5.8-8　　BY 系列永磁式步进电动机技术数据

型　号	额定电压 (V)	静态电流 (A)	相　数	步距角 (°)	保持转矩 (N·m)	负载起动频率 (Hz)	外形尺寸 (mm)			重量 (kg)
							总长	外径	轴径	
20BY	5	<0.09	4	18	0.0039	≥225	29	20	1.5	0.03
25BY001	12	0.17	4	15	0.005	400	13	25	3.5	0.03
26BY	12	<0.25	4	15	0.0049	550	21.5	25.4	3.57	0.035
28BYJ01	12	0.4	4	5.625/64	0.034	900	19	28	3	0.04
32BYJ001	15	0.12	2	90	0.007	150	36	32	3	0.05
35BYJ001	15	0.2	4	15	0.021	300	20	35	2	0.055
36BY	24	≤0.2	4	7.5	0.0196	≥230	78	36	6.37	0.07
36BY01	12	≤0.3	4	7.5	0.0294	≥230	45	36	3	0.07
36BY02	5	0.2	4	7.5	0.004	400	25	36		
42BY001	24	0.5	4	7.5	0.038	620	22	42	3	0.06
42BY002	24	0.5	4	7.5	0.063	500	22	42	3	0.06
42BY003	24	0.6	4	7.5	0.034	500	22	42	3	0.06
42BY48B02	24	0.18	4	7.5	0.039	430	15	42	3	0.06
42BY48B03	24	0.18	4	7.5	0.040	415	15	42	3	0.06
43BY4－7.5	24	0.6	4	7.5	0.088	320	36.5	43		0.18
45BY01	24		1	18	0.00784	80	32	45		
55BY001	24	0.17	4	7.5	0.117	250	24	55	6	0.07

表 5.8-9　　五相混合式步进电动机技术数据

型　号	相数	步距角(°)	相电流(A)	保持转矩(N·m)	转动惯量(kg·m²)	外形尺寸(mm×mm)
90BYG550A-0301	5	0.36/0.72	3.0	2.0	0.23	φ90×75
90BYG550B-0301	5	0.36/0.72	3.0	4.0	0.45	φ90×106
90BYG550C-0301	5	0.36/0.72	3.0	6.0	0.8	φ90×137
90BYG5200B-0301	5	0.36/0.72	3.0	5.0	0.45	φ90×106
90BYG5200D-0301	5	0.36/0.72	3.0	10.0	0.9	φ90×168
110BYG550B-0301	5	0.36/0.72	3.0	8.0	0.97	φ110×157
110BYG550C-0301	5	0.36/0.72	3.0	14.0	1.46	φ110×195
110BYG550D-0301	5	0.36/0.72	3.0	18.0	1.95	φ110×235
110BYG5200B-0301	5	0.36/0.72	3.0	10.0	1	φ110×157
110BYG5200C-0301	5	0.36/0.72	3.0	14.0	1.5	φ110×195
130BYG550D-0501	5	0.36/0.72	5.0	25.0	3.7	φ130×225
130BYG550E-0801	5	0.36/0.72	8.0	35.0	4.63	φ130×255

表 5.8-10　　三相混合式步进电动机技术数据

型　号		每转步数	相电压 (V)	相电流 (A)	额定转矩 (N·m)	保持转矩 (N·m)	最高起动转速 (r/min)	转动惯量 (kg·cm²)	重量 (kg)	接线方式 (线数)	外形尺寸 (mm×mm×mm)
57 型	VRDM364/LHA	/200 /400 /500 /1000 /2000 /4000 /5000 /10000	40VDC	5.2	0.45	0.51	6.3	0.1	0.45	6	57.2×87.2×42
	VRDM366/LHA			5.6	0.9	1.02		0.22	0.22		57.2×57.2×56
	VRDM368/LHA				1.5	1.74		0.38	1.1		57.2×57.2×79
90 型	VRDM397/LHA				1.7	1.92		1.1	1.65		85×85×67.5
	VRDM3910/LHA				3.7	4.18		2.2	2.7		85×85×97.5
	VRDM397/LWA		325VAC	1.75	2	2.26	5.3	1.1	1.65		85×85×67.5
	VRDM397/LWB								2.05	3	85×85×110
	VRDM3910/LWA			2	4	4.52		2.2	2.7	6	85×85×97.5
	VRDM3910/LWB								3.1	3	85×85×140
	VRDM3913/LWA			2.25	6	6.78		3.3	3.8	6	85×85×127.5
	VRDM3913/LWB								4.2	3	85×85×170
110 型	VRDM31117/LSB			2.5	12	13.92		10.5	8		110×110×180
	VRDM31117/LWB			4.1			4.7				110×110×180
	VRDM31122/LWB			4.75	16.5	19.14		16	11		110×110×228

第9章 开关磁阻电机驱动系统

1 概述

1.1 开关磁阻电机驱动系统的基本部件、原理及特点

1.1.1 基本部件

如图5.9-1所示，开关磁阻电机驱动系统主要由开关磁阻电动机（SRM）、功率变换器、控制器和检测器组成。

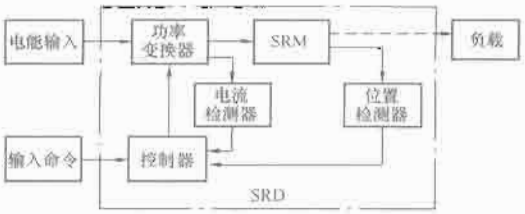


图5.9-1 开关磁阻电机驱动系统结构框图

开关磁阻电动机是开关磁阻电机驱动系统的执行元件。它的结构和工作原理与传统的交直流电动机有着根本的区别，它不像传统电动机那样依靠定、转子绕组电流产生磁场间的相互作用形成转矩和转速，而是遵循磁通总是要沿着磁导最大的路径闭合的"磁导最大原理"，产生磁拉力形成磁阻性质的转矩。因此，它的结构是转子旋转时，磁路的磁导要有尽可能大的变化，所以，开关磁阻电动机一般采用凸极定子和凸极转子型式，如图5.9-2所示，即所谓双凸极型结构，并且定、转子齿极数（简称极数）不相等。定子装有简单的集中绕组，一般径向相对的两个绕组串联构成"一相"，转子由叠片构成。

按相数分为单相、两相、三相、四相和多相；按气隙方向分为轴向式、径向式和径向—轴向混合式结构。一般来说，工业用开关磁阻电动机多采用图5.9-2表示的三相径向单齿式结构（四相和五相径向单齿式结构类似）。



图5.9-2 开关磁阻电动机基本结构

功率变换器是开关磁阻电动机运行时所需能量的供给者，是连接电源和电动机绕组的开关部件。功率变换器主电路的结构型式与供电电压、电动机相数及主开关器件的种类有关。图5.9-3所示为三相开关磁阻电动机的一种常用的功率变换器主电路。图中A、B、C为电动机相绕组，V1～V6为各对应相的可控开关器件，VD1～VD6为对应的续流二极管。

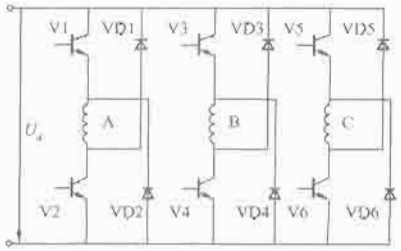


图5.9-3 三相开关磁阻电机功率变换器示意图

控制器是系统的决策和指挥部分。它综合位置检测器、电流检测器所提供的电动机转子位置、速度和电流等反馈信息及外部输入的命令，然后通过分析处理，决定控制策略，向功率变换器发出驱动信号等一系列命令，控制电动机运行。

控制器通常由具有较强信息处理功能的微机芯片或数字逻辑电路及接口电路等部分构成。微机信息的处理功能大部分由软件完成。

位置检测器是转子位置及速度信息的提供者，它及时向控制器提供定、转子齿极间实际相对位置的信号和转子运行速度的信号。

1.1.2 基本工作原理

如图5.9-1所示，当控制器接收到位置检测器提供的电动机内各相定子齿极与转子齿极相对位置信息时，即进行判断处理，向功率变换器发出命令，决定定子绕组中哪一相（如A相）绕组励磁；被励磁相（如A相）绕组的开关器件即导通，这时励磁相（如A相）绕组中有电流 i 流通，产生磁通，由于磁拉力作用转子上，靠近定子励磁相（如A相）的某对转子齿极就被吸引，使转子转动起来；当转子转到被吸引的转子齿极与定子励磁相（如A相）齿极重合（即所谓平衡位置）时，磁拉力消失，此时控制器会根据位置检测器的信息，在定、转子即将到达平衡位置时，向功率变换器发出命令，关断该励磁相（如A相）绕组的主开关器件。在这个过程中，控制器还会根据位置检测器提供的其他相的定、转子齿极相对位置和电动机运行速度等检测信号，在相应的时刻命令导通其他相绕组的主开关器件，使转子继续产生同方向的转矩，以保证转子连续不断地在一定速度下运行。

从上面分析可知，电流的方向对转矩没有任何影响，只要位置检测器能即时给出定、转子极间相对位置信息，控制器能及时和准确地控制定子各相绕组的通、断，电动机就能产生所要求的转矩和转速，以达到最佳运行状态。

1.1.3 特点

从结构和运行原理上看，开关磁阻电动机可以说是一种高速大步距的反应式步进电动机。两者的主要差别在于：步进电动机作为一种信息传输、实现角位移精密传动的执行机构，它的转子轴运动服从电源的换向，而电源的换向通常是与转子位置无关的，属于转子位置的开环控制，而开关磁阻

电动机则不同，其定子供电电源的换向与转子位置直接相关，必须根据转子位置检测器提供的位置反馈信息来实现，属于转子位置的闭环控制。

从运行状态上看，也可将开关磁阻电机驱动系统视为无刷直流电动机驱动系统的发展，两系统中电动机均运行在自同步状态。但无刷直流电动机的转子有励磁，定子多相绕组由逆变器提供交流电源，而开关磁阻电动机的转子则为反应式，无需励磁，定子绕组由直流脉冲电源供电，仅由简单的开关电路即能实现，这使得电动机结构和变换器结构都得到简化。

从工作原理以及与反应式步进电动机和无刷直流电动机的比较中可以看出，开关磁阻电动机驱动系统有如下基本特点：

1）共有 4 个可控参数，调速性能好。4 个可控参数为：

①开通角 θ_{on}。θ_{on}即定子相绕组接通电源瞬间定、转子齿极的相对位置角。改变主开关器件的触发导通时间可以改变 θ_{on}，可实现对电流大小和波形的控制，从而有效地调节电动机的转矩、转速和转向。

②关断角 θ_p。θ_p 即定子相绕组被切断电源瞬间定、转子齿极的相对位置角，记 $\theta_p-\theta_{on}=\theta_c$，显然，$\theta_c$ 代表主开关器件的导通期，称为导通角。θ_p 的大小也会影响相电流的波形，调节 θ_p，在一定范围内可以调节转矩，控制运行状态，并将影响系统的效率。

③相电流幅值 I_{max}。利用斩波调节方式控制的 I_{max} 大小，可达到调控开关磁阻电动机转矩和转速的目的。

④直流电源电压 U。U 即功率变换器的输出电压，可通过可控整流装置或斩波器调节其大小，实现对开关磁阻电动机的转矩转速调节。

总之，开关磁阻电机调速系统可控参数多，控制方便，可四象限运行，能实现各种特定要求下的控制和调节。

2）结构简单、可靠，适宜在恶劣条件下运行。开关磁阻电动机转子上无绕组、无永磁体、无集电环，仅由硅钢片叠成；定子绕组为集中式绕组，端接部分短，是一种结构最简单的电动机。由于开关磁阻电动机的转矩方向与相电流方向无关，只需要单向的电流励磁，因此，主开关器件数也可比常规的逆变器少，而且每个开关器件都与电动机相绕组串联，不会出现逆变器的直通短路故障，故其控制系统线路简单，可靠性高，特别是它可以缺相运行，容错能力强，适宜在航天飞机、电动汽车上作为起动/发电机或驱动系统使用。

3）在宽广的转速和功率范围内均具有高输出和高效率。

4）转矩脉动较大。

另外，开关磁阻电动机脉冲供电，电动机气隙小，因此有显著变化的径向磁拉力，加上结构及各相参数难免的不对称，从而形成振动和噪声。但只要注意合理设计斩波频率和电动机的结构，采用合适的加工工艺，加上适当的控制，振动和噪声是完全可以达到考核指标的。

1.2　研究与发展概况

开关磁阻电机驱动系统作为一种机电能量转换装置，与传统电机驱动系统一样遵循基本电磁感应定律和机电能量转换原理。但由于开关磁阻电机的双凸极结构，以及非线性开关电源供电等特点，使得开关磁阻电机驱动系统的设计与运行，都与传统电机驱动系统明显不同。在开关磁阻电机中，绕组电感是转子位置和相电流的非线性函数，驱动系统总是运行在绕组电感变化的瞬变过程中，没有一个真正的“稳态运行”。所谓的“稳态运行”实质上是周期性的从一个暂态到另一个暂态的切换。在连续的切换过程中，电机的结构设计、内部的磁场分布、铁心各部分的饱和程度、所采用的控制策略以及功率变换器的拓扑结构都对整个系统的性能具有重大影响。因此，开关磁阻电机驱动系统貌似简单，实际上却是一非线性、多变量、变结构的复杂系统，不借助现代数值计算技术、电子技术和数字控制技术以及计算机辅助设计是很难对开关磁阻电机驱动系统进行分析和研究的。对开关磁阻电机驱动系统的研究不仅仅局限于对其内部各种复杂电磁关系的研究，各种先进技术在开关磁阻电机驱动系统中的应用也是其研究的一个重要组成，两者相辅相成，是当前开关磁阻电机驱动系统研究的一个重要特点，也是开关磁阻电机驱动系统研究和发展的必然趋势。下面就当前有关开关磁阻电机驱动系统研究的几个主要方向做简要介绍。

（1）设计

开关磁阻电动机运行时，它的双凸极结构，不仅会出现定、转子极完全重合时的全局饱和，而且会出现定、转子齿极刚刚交叠或局部交叠时的局部饱和，也就是说，开关磁阻电动机的磁路饱和既与绕组励磁有关，也与定转子相对位置有关，因此，进行磁路设计时不能简单地套用传统的磁路法。

在设计方面，P. J. Lawrenson 等以线性化方法为基础讨论了开关磁阻电动机的齿极数、相数、极弧选择准则等问题，为开关磁阻电动机的设计开创了最初的理论基础。J. Corda 借助开关磁阻电动机线性模型导出理想化的转矩解析表达式，为开关磁阻电动机的优化设计提供了依据。Krishnan 等用常规电动机的设计方法推导了电动机的输出方程，对设计人员有着重大的参考价值。

20 世纪 80 年代中期以后，数值计算技术的发展有力地支持了开关磁阻电动机内部饱和磁场的分析以及电磁转矩的计算和动态仿真的进行。R. Arumugam、G. Dawson、A. G. Jack 等相继应用二维有限元法、边界元和有限元相结合法、自适应有限元法将开关磁阻电动机的研究引入更深、更新的境界。1992 年，英国的 S. Williamson 教授将三维有限元法用于开关磁阻电动机磁化曲线的计算，并实质性地开展了对端部磁场的有效探讨。

近年来，通过不同的模型简化，已建立了多种电磁转矩的计算方法，并由此形成了不同的设计方法。这些方法大致可以概括为线性方法、非线性方法、准非线性方法三类。目前，非线性仿真计算已成为研究开关磁阻电动机稳态运行的基本方法。Miller. T. J 提出的快速非线性法，以及 Stephenson. T. M 和 Corda. J 提出的非线性磁参数法，仍是常用的仿真方法。

开关磁阻电动机的损耗，特别是铁损耗计算是一个十分困难的课题，一方面因为铁心各部分既有全局的饱和，又有局部饱和，磁通是非正弦的；另一方面因为铁心磁场的频率随转速的变化而变化。因此，尚未有一个合适的方法来计算开关磁阻电动机的铁损耗。目前一般采用实验的方法，或用傅里叶级数分解法来估算开关磁阻电动机的铁损耗。

开关磁阻电动机的设计要比传统电动机复杂得多，还因为开关磁阻电动机的性能计算没有可用的解析表达式，需要通过对运行状态的仿真来计算电动机的性能。它集电动机的数字仿真、损耗计算、控制参数及电机参数优化于一体，是一个非常复杂的系统工程。以 Miller. T. J 和詹琼华为首的课题组分别研制了开关磁阻电动机设计的软件包，达到了商

品化的程度。

（2）功率变换器研究

功率变换器（又称主电路）设计的主要问题：一是功率器件的选择和电压电流定额的确定；二是主电路的拓扑结构设计。

20世纪80年代初，主开关器件皆用晶闸管（SCR）。鉴于开关磁阻电机驱动系统电流脉冲峰值较大，而SCR电流峰值和平均电流的比值高，能承受很大的浪涌冲击，一度被视为开关磁阻电机驱动系统中最理想的主开关器件。但SCR无自关断能力，开关频率低，强迫换相电路成本高，可靠性较差，由此构成的驱动系统的总体性能有一定局限性。后来较多应用GTR，但GTR承受浪涌电流能力差，存在二次击穿问题，不易保护，限制了其在高压、大功率场合下的应用。20世纪80年代中期，结合了SCR、GTR两者优点的GTO受到重视。因为GTO兼有自关断、快速开关能力，能承受较GTR高的电流、电压，所以早期的开关磁阻电机驱动系统产品中有不少采用GTO作主开关器件。近年来，考虑到GTO关断时要求相当大的反向控制电流，关断控制实现有难度，压控型的开关器件MOSFET和IGBT得到了广泛的应用。

确定主开关器件电流定额的关键是根据电流波形求其有效值或峰值，但困难在于相电流的精确解析式无法求出，而电压定额则主要与功率变换器的拓扑结构有关，由于电动机结构参数、控制参数、控制方式、功率变换器拓扑结构不同，将出现不同形状的电压和电流波形、开关器件的电压电流亦随之变化。因此，电压电流定额问题是一个如何将电动机、功率变换器、控制器三者作为一个整体优化设计的问题，必须针对具体的应用进行深入分析，才能有效确定主开关器件的电流电压定额。主电路的结构选择很大程度地决定着开关磁阻电机驱动系统性能和成本。现阶段开关磁阻电机驱动系统所采用的主电路有以下类型：①双绕组型；②不对称半桥型；③分裂直流电源型；④桥型；⑤电容储能型；⑥准谐振型等。

（3）位置检测的研究

位置检测是开关磁阻电动机同步运行的基础。开关磁阻电动机的各种高级控制技术都是以高精度的位置检测为首要条件。目前普遍采用外装光电式或磁敏式等轴位置检测器。但这不仅增加了系统的体积和成本，而且降低了系统的可靠性。为了消除轴位置检测器这一不利因素，新型的位置检测技术成为开关磁阻电动机研究的一大热点。

在新型的位置检测技术中，第一类是通过内置探测绕组或探测极板来检测转子的位置。这类方法主要问题是要在电机内部添加附加的硬件，控制器到电动机的引线也较多，并且检测电路也较复杂。

另一类则是完全意义上的无位置传感器检测方案。其主要特点是从主绕组的电压电流信号提取转子位置信息。如通过检测非导通相的绕组电感、直接的磁链电流法、检测绕组电流上升率、测量非导通相的感生电压、测量母线电流等来获得转子位置信息；采用滑模观测器及波形检测技术或状态观测器计算转子位置等。这类方法主要优点是不需要或附加很少的额外硬件，提高了系统的可靠性。但是到目前为止，这类检测方法都有其局限性，有些位置检测精度较低，有些应用条件（如高速、低速、多相导通等）受到限制，有些需要高性能的微处理器和高精度的检测器件支持，系统结构复杂，参数整定困难等。

总的来说，简单实用的无位置传感器检测方案还有待进一步开发，可以肯定，无位置检测器方案是开关磁阻电机驱动系统研究和应用的发展趋势。

（4）控制器及控制技术

控制器是实现开关磁阻电动机自同步运行和发挥优良性能的关键。伴随着微电子器件的飞速发展，开关磁阻电机控制系统也从早期的分立模拟器件组成的简单控制系统逐渐发展成为以高性能微处理器为核心的数字化控制系统，相应的专为电机控制设计的高性能数字信号处理器（DSP）给各种高级复杂控制系统的实用化提供了可能。研究的重点也随着微电子器件的发展逐步转移到控制策略的研究。在控制参数的优化方面，根据不同的系统需求，可选取不同的目标函数，如系统的效率最高、转矩脉动系数最小等。由于优化过程要涉及系统性能的仿真计算，且控制参数多、电机模型复杂，使得计算量大，而且得到的只是针对单个系统的优化结果。与传统的电机调速系统相比，开关磁阻电机驱动系统实现优化控制的难度要更高一些。

各种控制理论在开关磁阻电机驱动系统中的应用也逐渐增多。Bose BK等采用了传统的PI调节器，以斩波电流限值为控制变量，实现了开关磁阻电机的转速和转矩控制。一些现代的控制理论和方法在开关磁阻电动机的控制中也得到了应用，如模糊控制、模糊控制与PI控制结合在一起的混合式调节、滑模控制、自适应控制、线性回馈控制以及人工神经网络控制等。这些现代控制技术的使用部分解决了开关磁阻电机驱动系统的非线性多变量强耦合问题，但离实用技术还有一定距离，主要表现在一些控制技术中为仿真计算和设计目的提出的模型太复杂而难以用于开关磁阻电动机实时控制，而有的为控制目的提出的模型则过于简单而影响了控制的实际效果，或者因控制参数难以确定而失去实用的价值。但随着微电子技术和现代控制技术的发展，复杂而实用的控制技术将在开关磁阻电机驱动系统中得到切实应用。

（5）转矩脉动、振动和噪声的研究

人们往往认为转矩脉动是开关磁阻电动机的固有特性，但从理论上分析可以做到转矩脉动为零。解决开关磁阻电动机转矩脉动的技术关键是转矩分配函数和瞬时电流跟踪的实现。由于开关磁阻电动机模型的复杂性、电源电压的限制，以及当前的硬软件技术水平，要达到零转矩脉动是十分困难和高成本的。目前减少开关磁阻电动机的转矩脉动主要从两方面进行：一是通过优化电动机的定、转子极弧形状；二是通过采用优化开关角、模糊控制、滑模控制、神经网络控制等先进的控制技术来实现对转矩脉动的控制。

通过大量的试验和研究表明，开关磁阻电动机的转矩波动是产生噪声的原因之一。产生噪声的另一个主要原因是引起开关磁阻电动机电磁振动的定子铁心的脉动径向力。近年来，针对减少脉动径向力，降低转矩脉动以抑制开关磁阻电动机的振动和噪声，进行了大量的研究，取得很大成绩，已可以做到与变频感应电动机同水平。开关磁阻电动机的振动和噪声的抑制是一个综合技术，需要从三方面结合进行：一是从电动机本体设计着手，从增加定子铁心刚度和减少脉动径向力两方面来优化电机结构；二是从外部安装连接方式考虑，如为防止共振，采用弹性连接增加阻尼措施等；三是从电动机的控制策略方面着手，如采用提前关断角、两步换相法、三步换相法逐步降压等。它们都是通过减少脉动的径向力，降低振动达到降低噪声的目的。这些方法都有一定效果。近年来，有文章提出从声辐射模态分析来研究主动噪声抑制技术，但尚未见到应用案例。

2　开关磁阻电动机的基本工作原理和结构

2.1　工作原理

图 5.9-4 是一台 3 相 6/4 极开关磁阻电动机的横截面和一相电路的原理示意图。它的定子上有 6 个齿极（即 $N_s=6$），每个齿极上绕着一个线圈，直径方向上相对的两个齿极上的线圈串联组成一相绕组。转子沿圆周有 4 个均匀分布的齿极（即 $N_r=4$），齿极上没有线圈。定、转子间有很小的气隙。S1 和 S2 是电子开关，VD1 和 VD2 是续流二极管，U_d 是直流电源。

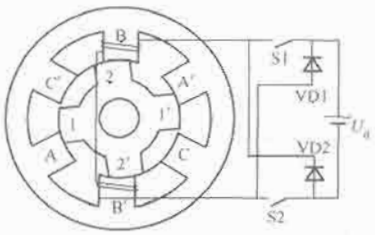


图 5.9-4　三相 6/4 极开关磁阻电动机示意图

当控制器接收到位置传感器（即检测器，下同）提供的各相定子齿极与转子齿极相对位置的信息时，即进行判断处理。例如，在图中定子 B 相齿极轴线 BB′与转子齿极 2 的轴线 22′不重合的情况下，控制器发出驱动信号触发相绕组的开关器件 S1 和 S2 导通，B 相绕组通电，而 C 和 A 两相绕组都不通电。电动机内建立起以 BB′为轴线的磁场，通过气隙的磁力线是弯曲的。此时，磁路的磁导小于定、转子齿极轴线 BB′和 22′重合时的磁导，转子受到气隙中弯曲磁力线的切向磁拉力所产生转矩的作用，使转子顺时针方向转动，转子齿极 2 的轴线 22′向定子齿极轴线 BB′趋近。当轴线 BB′和轴线 22′重合，即 B 相定、转子齿极对齐时，切线方向的磁拉力消失，转子停止转动，此时称转子达到稳定平衡位置。

若以图中定、转子所处的相对位置作为起始位置，依次对定子 B→C→A 相绕组通电，转子将处于顺时针方向的连续旋转状态；反之，若以 B→A→C 的顺序给绕组通电，转子则会处于逆时针方向的连续旋转状态。

由上述分析可以得到下面三点结论：

1）开关磁阻电动机的转矩是由磁通按磁导最大路径闭合的“磁导最大原理”而产生的。

2）为保证开关磁阻电动机能连续旋转，要求某一定子齿极与转子齿极重合时，相邻相的定、转子齿极轴线应错开 τ_r/q 机械角度。此处 q 为定子绕组相数；τ_r 为转子极（齿）距，$\tau_r=2\pi/N_r$，故开关磁阻电动机的定、转子齿数不能相等。

3）转子旋转 1 周，即 $\theta=2\pi$ 机械角度时，定子的 q 相绕组需轮换通 N_r 次电。因此，开关磁阻电动机的转速 n 与电动机电源输出频率（即功率变换器输出频率）f_D 间的关系为

$$f_D = qN_r \frac{n}{60} \tag{5.9-1}$$

式中，f_D 亦称开关磁阻电动机驱动系统的开关频率。任意一相定子绕组的开关频率为

$$f_p = \frac{f_D}{q} = \frac{N_r n}{60} \tag{5.9-2}$$

2.2　相数与定子、转子齿极数的关系

常规的开关磁阻电动机的相数 q 与定子齿极数 N_s 及转子齿极数 N_r 应受下列条件约束：

1）定子各相绕组和转子齿极应沿圆周均匀分布。

2）定子齿极数 N_s 应为相数 q 的 2 倍或 2 的整数倍，即 $N_s=2q$ 或 $N_s=2mq$，一般 m 可取 1，2，3，…。

3）定转子齿极数 N_s 和 N_r 的选择要匹配，要能产生必要的“重复”，以保证电动机能连续地转动。即要求某一相定子齿极与转子齿极轴线重合时，相邻相的定、转子齿极的轴线应错开 τ_r/q 机械角，即定、转子齿极数应满足下式

$$N_r = \left(1 \mp \frac{1}{mq}\right) N_s \tag{5.9-3}$$

式中，$m=1$，2，…，整数。

2.3　绕组的连接方式与极性分布

2.3.1　绕组的连接方式

1）一相绕组的各线圈之间正向串联，当绕组通电时，电动机内的磁场呈如图 5.9-5（a）所示两极型。

2）一相绕组的各线圈之间反向串联，当绕组通电时，电动机内的磁场呈如图 5.9-5（b）所示四极型。

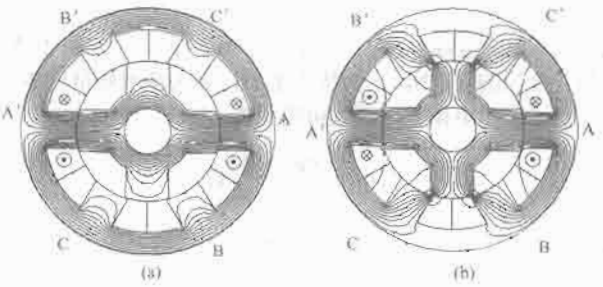


图 5.9-5　开关磁阻电动机磁场极性分布图
（a）两极型；（b）四极型

2.3.2　极性分布（以四相为例）

1）绕组正向串联，相邻相绕组为相同的同名端，其极性分布为 NNNNSSSS，如图 5.9-6（a）所示。

2）绕组正向串联，相邻相绕组为相反的同名端，其极性分布为 NSNSSNSN，如图 5.9-6（b）所示。

3）绕组反向串联，相邻相绕组同名端不同，其极性分布为 NSNSNSNS，如图 5.9-6（c）所示。

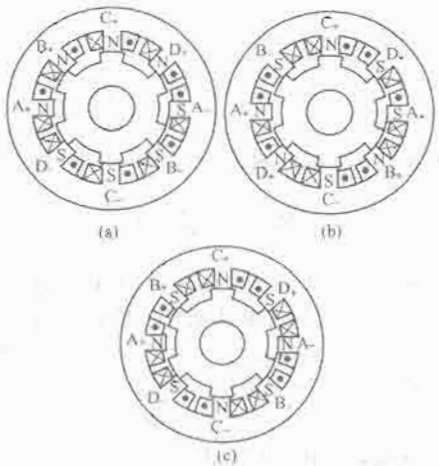


图 5.9-6　四相（8/6）开关磁阻电动机
定子齿极极性分布示意图

3 基本电磁关系

与传统的感应电动机和同步电动机不同，开关磁阻电动机的电流及磁链随时间呈单向性脉冲变化，其气隙磁场是脉动性质的，电磁转矩是磁阻转矩。又由于其双凸极结构和磁路的非线性，在运行期间，其相绕组电感不是常数，而是电流和转子位置的函数。因此，开关磁阻电动机的各种参数和各物理量都是转子位置角 θ 和电流的复杂函数，难以用简单的解析式来表达。本节首先从电动机磁路不饱和的假定条件出发，认为相绕组电感 $L(\theta)$ 的大小与绕组电流无关，据此建立电动机的线性化模型，利用它分析开关磁阻电动机的各物理量和它们之间的关系，然后在此基础上再考虑磁路饱和的情况，并建立电动机的非线性数学模型。

3.1 基本电路方程

从普遍的意义上讲，研究 q 相电动机的一相工作情况，如图 5.9-4 所示。设主开关 S1 和 S2 在 $\theta=\theta_{on}$ 时刻触发导通，在 $\theta=\theta_p$ 时刻关断，即 θ 在 $\theta_c=\theta_p-\theta_{on}$ 时间内为电源对相绕组供电阶段，当 $\theta>\theta_p$ 时为续流阶段，相应的电路方程为

$$\pm u = iR + \frac{d\Psi}{dt} \tag{5.9-4}$$

式中，u 为绕组端电压，$+u$ 适于供电阶段，$-u$ 用于续流阶段；R 为绕组电阻；i 为绕组电流；Ψ 为绕组匝链的磁链。

忽略绕组电阻，则上式可简化为

$$\pm u = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{d\theta}\Omega$$

或

$$d\Psi = \pm \frac{u}{\Omega} d\theta \tag{5.9-5}$$

式中，$\Omega=d\theta/dt$，为转子角速度。

如果以主开关触发开通角 θ_{on} 为时间坐标原点，则可得到相绕组磁链的变化规律

$$\Psi = \begin{cases} \dfrac{u(\theta-\theta_{on})}{\Omega} & \theta_{on} \leqslant \theta \leqslant \theta_p \\ \dfrac{u}{\Omega}(2\theta_p-\theta_{on}-\theta) & \theta_p \leqslant \theta \leqslant \theta_w \\ 0 & 0 \leqslant \theta \leqslant \theta_{on} \\ & \theta_w \leqslant \theta \leqslant 2\pi/N_r \end{cases} \tag{5.9-6}$$

式中，θ_w 为续流至磁链下降为零时的角度。在此处假定 $\theta_w=2\theta_p-\theta_{on}$。

定义相绕组电感为 L，即有

$$\Psi = Li \tag{5.9-7}$$

相应，相绕组电动势

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -L\frac{di}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} - i\frac{\partial L}{\partial\theta}\frac{d\theta}{dt} \tag{5.9-8}$$

设电动机匀速旋转，则式（5.9-4）可改写为

$$\pm u = Ri + L\frac{di}{d\theta}\Omega + i\frac{\partial L}{\partial\theta}\Omega \tag{5.9-9}$$

在忽略磁通边缘效应和磁路的非线性的条件下转子转动一个转子极距 τ_r 时，绕组电感随转子位置角的变化曲线如图 5.9-7 所示。图中坐标原点 $\theta=0$ 定义为定子齿极轴线与转子齿极间中心线重合时的转子位置角。

当转子转动时，电动机绕组电感 L 在 L_{max} 与 L_{min} 2 个特定电感之间周期变化，其变化频率与转子齿极数成正比，周期为转子齿极距 τ_r。绕组电感 L 与转子位置角的关系可以用函数形式表示为

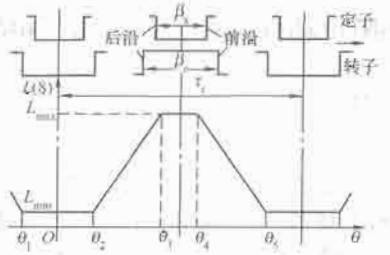


图 5.9-7 电感 L 与位置角关系 $L=f(\theta)$

$$L(\theta)\begin{cases} L_{min} & \theta_1 \leqslant \theta \leqslant \theta_2 \\ K(\theta-\theta_2)+L_{min} & \theta_2 \leqslant \theta \leqslant \theta_3 \\ L_{max} & \theta_3 \leqslant \theta \leqslant \theta_4 \\ L_{max}-K(\theta-\theta_4) & \theta_4 \leqslant \theta \leqslant \theta_5 \end{cases} \tag{5.9-10}$$

式中，$K=(L_{max}-L_{min})/(\theta_3-\theta_2)=(L_{max}-L_{min})/\beta_s$，$\beta_s$ 是以角度表示的定子齿极极弧宽度。

利用傅里叶级数分解式（5.9-10），取平均分量和基波分量，得绕组电感 $L(\theta)$ 的近似表达式为

$$L(\theta) = L_{min} + L_1(1-\cos N_r\theta) \tag{5.9-11}$$

式中，$L_1=(L_{max}-L_{min})/2$。

3.2 相绕组电流

通电相绕组中的电流 i，可由求解微分方程（5.9-9）得到。由式（5.9-9）可知，在转速、电压一定的条件下，绕组电流仅与转子位置角和初始条件有关。设开通角 θ_{on} 在区域 $\theta_1\sim\theta_2$ 内，θ_p 在区域 $\theta_2\sim\theta_3$ 内。这样，电流 $i=i(\theta)$ 有可能是一个五段的分段函数，如图 5.9-8 中的曲线 1 所示。它可以用一通式来表示，即

$$i = \frac{u}{\Omega}f(\theta) \qquad \theta_1 \leqslant \theta \leqslant \theta_5 \tag{5.9-12}$$

对应不同的区域，$f(\theta)$ 不同，它是几何尺寸和转子位置角 θ 的函数。

分析式（5.9-12）可知，在电源电压为恒定直流电压、转速 n 等于常数的条件下，电流的波形函数，即 $i(\theta)$ 不仅与每相绕组通电的开通角 θ_{on}、关断角 θ_p（或者说导通角 θ_c）相关，还与电动机的最大电感 L_{max}、最小电感 L_{min} 和定子极弧宽度 β_s 等参数有关。图 5.9-8 表示在电压 u、转速 n 恒定时，对应 3 种不同开通角 θ_{on} 的电流波形。

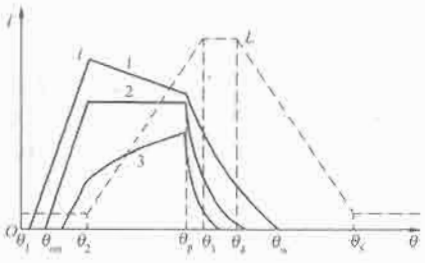


图 5.9-8 不同开通角下的相电流波形

现在分析电流随转速 n、θ_{on} 和 θ_p 变化的关系。在电源一定条件下，高速运行时，Ω 大电流上升速度很慢；低速运行时，Ω 小电流上升速度很快。减小 θ_{on} 亦即 θ_{on} 向 θ_1 方向移动，电流幅值就随之而增加；另一方面，调节 θ_p 又可以改变电流波形宽度，亦即改变电流波形。

3.3 转矩、功率与能量传递

从机电能量转换原理可知，开关磁阻电动机的转矩可以通过磁场储能 W_m 或磁共能 W'_m 对转子位置角 θ 的偏导数求

得，即

$$T=\left.\frac{\partial W'_{\mathrm{m}}}{\partial\theta}\right|_{i=C} \tag{5.9-13}$$

在线性化模型情况下有

$$W_{\mathrm{m}}=W'_{\mathrm{m}}=\frac{1}{2}i\Psi=\frac{1}{2}i^2L(\theta) \tag{5.9-14a}$$

$$T=\frac{1}{2}i^2\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta} \tag{5.9-14b}$$

在一个通电周期（即 $\theta_{\mathrm{w}}-\theta_{\mathrm{on}}$）内，磁共能的增量可表示为

$$\Delta W'_{\mathrm{m}}=\oint\Psi\mathrm{d}i \tag{5.9-15}$$

根据式（5.9-13）可以算出一相绕组一个通电周期内产生的平均电磁转矩

$$T=\frac{\partial W'_{\mathrm{m}}}{\partial\theta}=\frac{\Delta W'_{\mathrm{m}}}{\Delta\theta}=\frac{1}{\theta_{\mathrm{w}}-\theta_{\mathrm{on}}}\oint\Psi\mathrm{d}i=\frac{1}{\Delta\theta}S \tag{5.9-16}$$

如图 5.9-9 所示，在开关磁阻电动机 $\Psi-i$ 平面图中，面积 $S=\oint\Psi\mathrm{d}i$，代表一相绕组通电一次的磁共能增量。

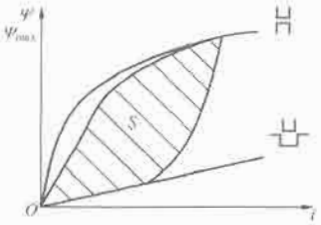


图 5.9-9　开关磁阻电动机的 $\Psi-i$ 平面轨迹图

当定子的 q 相绕组轮流通电一次时，转子转动了一个转子齿极距 $\tau_{\mathrm{r}}=2\pi/N_{\mathrm{r}}$，则开关磁阻电动机的平均电磁转矩可以表示为

$$T_{\mathrm{av}}=\frac{q}{2\pi/N_{\mathrm{r}}}\oint\Psi\mathrm{d}i=\frac{N_{\mathrm{r}}N_{\mathrm{s}}}{4\pi}\oint\Psi\mathrm{d}i \tag{5.9-17}$$

将磁链式（5.9-6）写成 $\Psi=u\Psi(\theta)/\Omega$，并和电流通式（5.9-12）一起代入式（5.9-17），改变积分变量，得

$$T_{\mathrm{av}}=\frac{N_{\mathrm{r}}N_{\mathrm{s}}u^2}{4\pi\Omega^2}\int_0^{2\pi/N_{\mathrm{r}}}\Psi(\theta)\mathrm{d}f(\theta) \tag{5.9-18}$$

在线性化模型情况下，当 θ_{on} 和 θ_{p} 给定时，积分 $\int\Psi(\theta)\mathrm{d}f(\theta)$ 存在，且是一个常数。由式（5.9-18）可知，开关磁阻电动机运行时平均电磁转矩 T_{av} 与角速度 Ω 的二次方成反比，电动机的电磁功率与 Ω 成反比，即

$$P_{\mathrm{em}}=T_{\mathrm{av}}\Omega\propto\frac{1}{\Omega} \tag{5.9-19}$$

$$T_{\mathrm{av}}\propto\frac{1}{\Omega^2} \tag{5.9-20}$$

下面分析开关磁阻电动机运行时的能量传递。在忽略电阻损耗假设条件下，将式（5.9-9）两边乘以电流 i 并进行微分变换，得

$$\pm ui=\Omega\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\theta}\left(\frac{1}{2}Li^2\right)+\frac{1}{2}\Omega i^2\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta} \tag{5.9-21}$$

上式左端项取“+”，表示相绕组的主开关 S 接通，单位时间内从电源输入电能 ui；取“−”表示主开关 S 断开，相绕组向电源充电。

从式（5.9-21）看，当相绕组开关 S 导通时，单位时间从电源输入的电能 ui 中，一部分用于增加磁场储能 $\left(\frac{1}{2}Li^2\right)$，一部分转换为机械能输出 $\left(\frac{1}{2}\Omega i^2\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta}\right)$。当相绕组开关 S 在电感增加区域（$\theta_2\leqslant\theta\leqslant\theta_3$）内关断时，此区域 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta$ 为正值，式（5.9-21）右端第二项为正，它代表仍有机械能输出，说明磁场储能只有一部分返回电源；另一部分转换成机械能。若开关 S 在 $\theta_2\leqslant\theta\leqslant\theta_4$ 区域内关断，则磁场能全部返回电源，没有机械能输出。若 S 在 $\theta_4\leqslant\theta\leqslant\theta_5$ 电感下降区关断，$\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta$ 在这个区域为负值，所以 $\frac{1}{2}\Omega i^2\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta}$ 为负，它表示有部分机械能转变成电能反馈回电源，即在这个区域内反馈回电源的能量有两部分：一部分是全部的磁场储能；另一部分是来自再生制动的机械能。

3.4　数学模型

一台 q 相开关磁阻电动机，假设各相结构和参数相同或对称，且忽略铁心损耗，就可以看成是有 q 个电端对的机电装置，如图 5.9-10 所示。



图 5.9-10　q 个电端对的机电装置图

根据机电动力学知识，可以得到开关磁阻电动机各物理量计算的数学模型为

$$\begin{cases}u_k=R_ki_k+\dfrac{\mathrm{d}\Psi_k}{\mathrm{d}t}\\ \Psi_k=\Psi(i_1,i_2,\cdots,i_k,\cdots,i_q,\theta)\\ T_{\mathrm{em}}=\dfrac{\partial W'_{\mathrm{m}}(i_1,i_2,\cdots,i_k,\cdots,i_q,\theta)}{\partial\theta}\quad(k=1,2,\cdots,q)\\ T_{\mathrm{em}}=J\dfrac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t}+k_\Omega\Omega+T_{\mathrm{L}}\\ \Omega=\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\end{cases} \tag{5.9-22}$$

式中，J 为开关磁阻电动机转子以及传动机构和负载换算到电动机轴上的转动惯量；k_Ω 为黏性摩擦系数；T_{L} 为负载转矩。

由于磁路非线性、磁通的复杂分布、各相之间的磁耦合等影响，使式（5.9-22）实际上很难计算，一般是针对具体运行状态和研究目的进行必要的简化。

3.5　机械特性

由表达式（5.9-18）

$$T_{\mathrm{av}}=\frac{N_{\mathrm{r}}N_{\mathrm{s}}u^2}{4\pi\Omega^2}\int_0^{2\pi/N_{\mathrm{r}}}\Psi(\theta)\mathrm{d}f(\theta)=\frac{u^2}{\Omega^2}Kf(\theta_{\mathrm{on}},\theta_{\mathrm{c}}) \tag{5.9-23}$$

可知，当外加电压 u 给定、开通角 θ_{on} 和导通角 $\theta_{\mathrm{c}}=(\theta_{\mathrm{p}}-\theta_{\mathrm{on}})$ 固定时，开关磁阻电动机的转矩与转速的变化关系类似直流电动机的串励特性，在 u、θ_{on}、θ_{c} 3 个条件中，任意固定两个，改变另一个可得到三组串励特性。对几何尺寸一定的开关磁阻电动机，在最高外施电压 $U_{\max}$、允许的最大磁链 $\Psi_{\max}$ 与最大电流 $i_{\max}$ 条件下，有一个临界转速 n_{fc}（或 Ω_{fc}），称为第一临界转速，它是开关磁阻电动机能达到最大转矩的最高速度。

由式（5.9-6）和式（5.9-12）可知，在一定的导通角 θ_{c} 条件下，随着转速 n 的降低，Ψ 和 i 将增大。因此，在开关磁阻电动机运行转速低于 n_{fc} 时，为了保证 Ψ 和 i 不超过允许值，必须采用可控条件，即改变电压、导通角 θ_{c} 和开

通角 θ_{on} 三者中任一个或任两个，以实现 Ψ_{max} 值和 i_{max} 值的限定和得到恒转矩特性。

当开关磁阻电动机运行转速高于 n_{fc} 时，在外加电压 u、θ_{on} 和 θ_c 都一定的条件下，由式（5.9-6）和式（5.9-12）可知，随 Ω 的增加，Ψ 和 i 将下降，转矩则随 Ω 的二次方下降。因此，为了得到恒功率特性（$T\Omega$=即常数），也必须采用可控条件。但是外加电压最大值是由电源的功率变换器决定的，而导通角一般不能超过 π/N_r，因此在 $u=u_{max}$、$\theta_c=\pi/N_r$ 和最佳的开通角 θ_{on} 条件下，能得到最大功率 P_{max} 的最高转速，也就是恒功率特性的转速上限，称为第二临界转速 n_{sc}（或 Ω_{sc}），当转速再增加时，由于可控条件都已达到极限，转矩不再随 Ω 的一次方下降，开关磁阻电动机又呈串励特性，如图 5.9-11 所示。

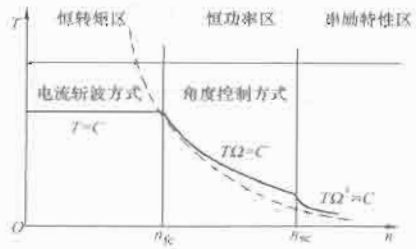


图 5.9-11 开关磁阻电动机典型机械特性

运行时存在着第一、第二两个临界转速是开关磁阻电动机的一个重要特点，是开关磁阻电动机设计的依据之一。采用不同的可控条件匹配可以得到各种各样所需的机械特性，这就是开关磁阻电动机具有优良调速性能的一个原因。

4 开关磁阻电动机电磁设计要点

4.1 设计思想

开关磁阻电动机与其他传统电动机一样是作为机电能量转换元件，其最主要的技术性能指标是单位体积（或质量）可转换的转矩（或功率），它表征电动机的材料利用率。因此，开关磁阻电动机设计的基本公式也是表述电磁转矩（电机功率与转速）和主要尺寸之间关系的输出方程。

从对开关磁阻电动机设计要求的角度来看有下列特殊点：

1）开关磁阻电机驱动系统是一个机电一体化的系统，没有控制系统，电动机不能运行，它的设计包括电动机本体、主电路、控制器的硬软件等多个相关部分，是多位一体的系统设计。因此，在电动机本体设计之前，有一个整个系统的总体设计，其主要任务是根据给定任务的技术性能指标，协调、优化和给出各部件（电动机、功率变换器等）的技术性能指标。

2）根据开关磁阻电动机的工作原理，其绕组电压和电流均是非正弦单方向性的脉冲波形，它传递能量的电磁转矩是磁阻性的转矩，一般采用双凸极结构，它可以实现在一定的体积下，有较大的 $\partial L/\partial\theta$ 而获得较高的材料利用率。

3）由于采用双凸极结构，因此电动机有一族磁化曲线，即每一个定、转子齿极相对位置有一条对应的磁化曲线。

4）为获得单位体积高输出转矩，电动机铁心一般设计为高饱和状态。

5）根据传统电动机电磁设计的磁负荷和电负荷定义，开关磁阻电动机是一种高电负荷、低磁负荷电动机。

4.2 主要技术指标

在进行开关磁阻电动机设计时，通常给出以下技术指标。

1）额定电压 U_N(V)。一般用户只给出开关磁阻电机驱动系统的供电电源电压，但由于采用不同型式的功率变换器，开关磁阻电机的输入电压值并不相同，因此，开关磁阻电动机的额定电压需要根据功率变换器的输出电压决定。例如，开关磁阻电机驱动系统供电电源电压是交流 380V，若采用三相全波整流分裂式有中线电路，则开关磁阻电动机的额定电压取 280V。

2）额定转矩 T_N(N·m)。一般选定恒转矩调速区域的最大转速所对应的最大转矩值为额定转矩，或选定恒功率区最低转速所对应的转矩为额定转矩。

3）额定转速 n_N(r/min)。根据恒功率区与恒转矩区范围的大小，通常由第一临界转速 n_{fc}（又称基速 n_b）来确定额定转速 n_N，$n_N=n_{fc}$（或 n_b）在恒功率区较宽的场合，也可取 $n_N<n_b$。

4）额定功率 P_N(kW)。一般指开关磁阻电动机稳态运行在额定转速 n_N、额定转矩 T_N 时的输出功率

$$P_N = T_N\Omega_N,\ \Omega_N = \frac{2\pi n_N}{60}$$

5）效率 η_N。

6）调速范围与相应的机械特性要求。一般给出其稳态运行时的最低转速 n_{min} 和最高转速 n_{max} 以及相应的机械特性。

另外，某些用户根据产品用途，可能给出其他方面的技术指标，如起动转矩等。没有特别提出的技术性能，则与传统电动机一样，按有关的国家标准或技术条件（主要指感应电动机的技术条件）的要求进行设计。

4.3 主要尺寸与转矩的关系——输出方程

开关磁阻电动机可以类似传统电动机推导出一个输出方程以建立电动机主要尺寸、电磁负荷和输出转矩之间的关系，从而使电动机设计者的经验能有效地应用到开关磁阻电动机的设计中。开关磁阻电动机的输出方程可以表示为

$$T_{em} = K_d K_1 K_2 K_B \eta_e \left(\frac{\pi D_{ri}^2 l_{ef}}{4}\right) BA \times 10^{-4} \tag{5.9-24}$$

或

$$\begin{aligned}\frac{T_{em}}{V_r} &= K_d K_1 K_2 K_B \eta_e BA \times 10^{-4} \\ &= K' BA \times 10^{-4} = K_A K' \\ &= K_d K_1 K_2 K_B \eta_e\end{aligned} \tag{5.9-25}$$

式中，η_e 为只考虑绕组铜损时的效率；$V_r=\pi D_{ri}^2 l_{ef}/4$，为定子内腔的体积。由于开关磁阻电动机气隙很小，可以认为它是转子圆柱体积。

现在分析式（5.9-25）的各个系数。

$K_1=\sqrt{2}N_r\beta_s/(\pi q)$，对选定绕组相数 q 和转子齿极数 N_r 的电动机，定子极弧宽度 β_s 只能在一个较小范围内变化，因此，K_1 只有一个较小的变化范围。

K_2 是个依赖于开关磁阻电动机工作点的可变量，取决于定子相电流、铁心材料的磁化特性及电动机的几何尺寸。对于一个给定的运行工作点，K_2 是一个常数。因此，常选取定子相绕组通过最大电流时的工作点进行计算，以使开关磁阻电动机接近最大的输出功率。通常，在额定工作点，K_2 的范围为 0.65～0.75。

K_d 称为负荷因数，它可以表示为 $K_d=qN_r\theta_c/(2\pi)$。在假定 50% 占空比的矩形波电流，$\theta_c=\tau_r/2=\pi/N_r$ 时，$K_d=q/2$。一般 $\tau_r/q<\theta_c\leqslant\tau_r/2$，即 $K_d=1\sim q/2$。

$K_B = B/B_s$，表示开关磁阻电动机的磁负荷 B 与最大电感位置时定子齿极中的平均磁通密度 B_s 之比。

从式（5.9-25）可以看出，K_A 与普通电动机的利用系数有相同的含义，它的大小反映了电动机有效材料的利用程度。

从有关文献给出的感应电动机与开关磁阻电动机比较表中可见，开关磁阻电动机的利用系数 $K_A = 0.0264\text{N} \cdot \text{m}/\text{cm}^3$；普通感应电动机 $K_A = 0.024\text{N} \cdot \text{m}/\text{cm}^3$，高效率感应电动机 $K_A = 0.0163\text{N} \cdot \text{m}/\text{cm}^3$。这说明开关磁阻电动机的有效材料利用率比较高。

4.4　电负荷 A 和磁负荷 B

用传统电动机设计的观点看，开关磁阻电动机的设计特点是低磁负荷和高电负荷。

开关磁阻电动机中，通常磁路设计较饱和，定子齿极磁通密度 B_s 取值 1.3～2.1T，定子齿极宽 b_s 取值为 $b_s \approx (0.3 \sim 0.55)\tau_s$。

故磁负荷可用下式估计

$$B \approx (0.3 \sim 0.55)\frac{N_s}{2N_r}B_s \tag{5.9-26}$$

开关磁阻电动机的电负荷为

$$A = \frac{2qN_{ph}I}{\pi D_{i1}} \tag{5.9-27}$$

式中，N_{ph} 为每相绕组串联匝数；I 为相电流。

在开关磁阻电动机初步设计中，可按下面经验公式预估计 I_m 和 I（I_{rms}）

$$I_m = \frac{K_i P_N \times 10^3}{\eta U_d} \tag{5.9-28}$$

$$K_i = \frac{I_m}{I} \tag{5.9-29}$$

式中，P_N 为电动机额定功率，kW；U_d 为电动机相电压，V；η 为电动机效率；I_m 为相电流最大值，A；$I(I_{rms})$ 为相电流有效值，A。

对 50%占空比的矩形波，绕组电流有效值 I 与幅值 I_m 的关系为 $I = I_m/\sqrt{2}$。

在开关磁阻电动机中，选定电负荷 A 时要考虑很多因素，很难单纯从理论上确定。在预先选择主要尺寸时，可以参考下列 A 值范围选取

$$A = 300 \sim 1000\text{A/cm}$$

4.5　主要尺寸和主要参数选择

4.5.1　主要尺寸

开关磁阻电动机的主要尺寸可以根据输出方程式（5.9-24）由给定额定转矩 T_N、预选电负荷 A 和磁负荷 B 以及 K' 等初步确定。还要选择主要尺寸比 $\lambda = l_{ef}/D_{i1}$。注意这里不是用 l_{ef}/τ，因为一般情况下开关磁阻电动机极对数 $p = 1$。λ 的大小与电动机运行性能、经济性、工艺性均有密切关系，其具体影响与传统电动机类似。在小型开关磁阻电动机中，λ 一般在 0.5～2.5 之间变化。

选择好 B、A、K_A 及 λ 后，可以通过式（5.9-30）求出 D_{i1}。

$$T_{em} = K_A V_r = K_N D_{i1}^3 \times 10^{-6} \tag{5.9-30}$$

$$K_N = \frac{\pi}{4}\lambda K_A \tag{5.9-31}$$

$$l_{ef} = \lambda D_{i1} \tag{5.9-32}$$

在工程实际中常采用“类比法”来选择开关磁阻电动机的主要尺寸。即根据设计的开关磁阻电动机的具体条件（结构、材料、技术经济指标、工艺等），参照相近容量相近转速的感应电动机的尺寸作为开关磁阻电动机的主要尺寸初选值或参考值。

4.5.2　第一气隙长度 g 和第二气隙长度 g_j

通常电动机中所指的气隙长度 g，在开关磁阻电动机中叫第一气隙长度（或气隙长度）。g 是指定、转子齿极轴线重合时两极面之间空气隙的距离，它的大小直接影响最大电感 L_{max} 值。第二气隙长度 g_j 是指定子齿极轴线与转子齿极间中心线重合时，定子齿极表面到转子槽底的距离，即

$$g_j = g + h_r \tag{5.9-33}$$

式中，h_r 为转子槽高（又称转子极身高）。

要想获得最大的输出转矩，要求开关磁阻电动机的定子绕组电感值应随转子位置的改变产生尽可能大的变化，这就要求尽可能减少第一气隙长度 g，g 的大小主要受制造和装配工艺的约束，但考虑 g 对开关磁阻电动机振动和噪声的影响，g 不可能取得很小，一般以等于或略小于同容量笼型感应电动机的气隙长度为宜。

理论上希望第二气隙长度 g_j 尽可能大，以得到较小的最小电感 L_{min}。但计算证明 g_j 与转子齿宽的比值大到一定程度时对减少 L_{min} 影响甚微，即 g_j 存在着一个最佳值。一般根据转子磁轭的磁通大小、齿根的机械强度等方面的要求决定 g_j 值。

4.5.3　相数 q

相数 q 的选择不仅影响整个开关磁阻电动机的性能，也影响功率变换器电路的类型与成本，相数越多，功率变换器成本越高。相数多的电动机有较好的起动特性和更大的灵活性。由式（5.9-1）可知，电源开关频率 f_D 与相数 q 有很大关系。随着相数和开关频率的增加，电动机内的铁心损耗及功率变换器损耗也增加。因此，在高效节能为首要要求的场合，应将相数尽可能选择少一些。同时相数减少，还可以使功率变换器的设备费用减少。式（5.9-3）给出了相数与定、转子齿极数之间的约束关系。总之，相数的选择要根据开关磁阻电动机的实际用途和具体条件来确定。

4.5.4　定子、转子极弧宽度

选择定子极弧宽度 β_s、转子极弧宽度 β_r 时应考虑下列要求：

1）获得尽可能小的最小电感 L_{min}。

2）减少漏磁。

3）保证必要的绕组空间。

4）起动性能好。

5）尽可能大的输出转矩。

综合上述要求，可以得到定子极弧宽度的取值范围为

$$\frac{\pi}{q(q-1)} \leqslant \beta_s \leqslant \frac{\pi}{q} \tag{5.9-34}$$

相应地，转子极弧宽度的取值为

$$\frac{\pi}{(q-1)} - \beta_s \geqslant \beta_r \tag{5.9-35}$$

根据开关磁阻电动机参数优化研究表明：定子、转子极弧宽度的取值尽可能在下述范围内：

定子极弧宽度　$\beta_s = (0.3-0.42)\tau_r$　　(5.9-36)

转子极弧宽度　$\beta_r = (0.9-1.4)\beta_s$　　(5.9-37)

4.5.5　每相绕组串联匝数 N_{ph}

从 $A = 2qN_{ph}I/\pi D_{i1}$ 可以看到，对于给定的电负荷和定子内径 D_{i1}，匝数 N_{ph} 和电流的乘积是一常数。对给定的几何尺寸，绕组有效空间是一定的，因此，$N_{ph}I$ 乘积受到绕组有效空间的约束。还需要考虑温升问题。温升直接与电流密度 J 和电负荷 A 的乘积有关。从参数角度分析，绕组匝

数越多，则电流越小，绕组电感增大；绕组匝数少，则绕组电阻、电感都相对小。从性能方面看，绕组匝数增加，磁通密度降低，铜损耗变大，效率降低，但对降低开关器件的容量及系统的成本有利。综上所述，在绕组匝数的设计时需要综合考虑各种因素，很难给出一个简单的选择原则。

4.6 转矩计算

开关磁阻电动机的主要性能指标是转矩，包括各种运行状态下的转矩特性，如矩角特性（静态转矩与转角关系）、稳态转矩（功率）转速特性及制动转矩等。转矩大小不仅决定着开关磁阻电动机的几何尺寸，还决定着与之匹配的功率变换器的容量和控制器的控制策略。

因为开关磁阻电动机的磁化曲线呈严重的非线性，所以转矩计算相当复杂。目前，通过采用不同的简化模型，得到不同的电磁转矩计算方法，形成三类不同的设计方法：

1）线性方法。它以理想线性模型和准线性模型的转矩公式为出发点，推出转矩与开关磁阻电动机主要尺寸的关系，从而决定开关磁阻电动机的几何尺寸和绕组匝数，再进行性能预估。由于这类方法假设绕组电感仅随转子位置角变化而与电流无关，电流和转矩都可以用解析式表示，设计和性能校核都较简便。然而开关磁阻电动机实际运行时是高度非线性的，用这类方法进行设计缺乏可靠性。

2）非线性方法。这类方法考虑了磁路的非线性，其代表就是用有限元法（或其他数值计算方法）计算出不同转子位置角的磁化曲线和电流、转矩等性能参数。这种方法需要花费大量的时间和费用。

3）准非线性方法。它是目前研究得最多的方法。准非线性方法有多种，有代表性的是以利用尽可能精确的最大电感位置和最小电感位置的磁化曲线以及50%占空比的矩形波电流计算平均转矩的方法作为出发点，建立开关磁阻电动机的电磁设计方法。

这里，介绍一种较常用的计算方法——面积等效法计算电磁平均转矩，它以开关磁阻电动机的最大电感位置和最小电感位置的两条磁化曲线为基础。

图5.9-12画出了一台开关磁阻电动机的两条特定磁化曲线：最大电感位置磁化曲线OB和最小电感位置磁化曲线OA。若用一个有效值等于实际绕组电流有效值 I 的50%占空比的矩形波电流 i 来代替绕组中的实际电流，那么，矩形波电流的幅值为 $i=\sqrt{2}I$。图5.9-12中面积 S_{OABO} 是代表开关磁阻电动机在励磁相绕组的开通角 $\theta_{on}=0$（即在转子转到最小电感位置时，主开关器件导通）和关断角 $\theta_p=\tau_r/2$（即转子转到最大电感位置时，主开关器件断开）的导通期内，一相绕相中通过电流幅值 $i=\sqrt{2}I$ 的50%占空比的矩形波电流条件下，一个周期所转化的机械能。

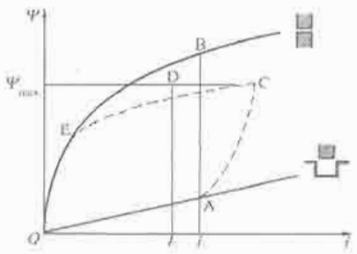


图5.9-12 转矩计算用图

设绕组中的实际电流一个通电周期，在 $\Psi-i$ 平面上的轨迹曲线OACE所包围的面积为 S（见图5.9-12）。由式（5.9-17）平均电磁转矩为

$$T=\frac{qN_r}{2\pi}S \tag{5.9-38}$$

那么，开关磁阻电动机轴上输出的平均转矩应为

$$T_{av}=\frac{qN_r}{2\pi}\eta_i S \tag{5.9-39}$$

式中，η_i 为只考虑铁耗时的效率。

引入系数 k_i，它定义为

$$k_i=\frac{\eta_i S}{S_{(OABO)}} \tag{5.9-40}$$

系数 k_i 是考虑用矩形波电流代替真实电流引起的差别的一个系数。在斩波控制方式运行时，实际电流波形与矩形波电流波形十分接近，k_i 接近等于1。通过分析与计算表明，一般 k_i 在0.8～1.1之间变化，将 k_i 代入式（5.9-39）得

$$T_{av}=\frac{qN_r}{2\pi}k_i S_{(OABO)} \tag{5.9-41}$$

当已知 $\Psi=f(i)\Big|_{\theta=0}$ $\Psi=f(i)\Big|_{\theta=\tau_r/2}$ 和绕组电流的有效值为 I 时，$S_{(OABO)}$ 可以利用数值积分计算出来，因此只要取定 k_i 值，则在一定转速下稳态运行的平均输出转矩可用式（5.9-41）计算。转矩计算结果的误差可以估计出来，因为误差主要来源于 k_i 的取值。这种计算转矩方法的优点是方便、有效、满足工程精度要求，可以用于电动机设计中校核和预估转矩性能。从转矩计算可知，开关磁阻电动机磁路计算时，最少要计算两条磁化曲线：一是定、转子齿极轴线重合位置的磁化曲线，此条磁化曲线称为最大电感位置磁化曲线，另一条是定子齿极中心线与转子齿极间轴线重合位置的磁化曲线，又称最小电感位置磁化曲线。

采用有限元数值计算方法，可以计算出每一个位置的磁化曲线，计算的磁化曲线愈多，电磁转矩计算值愈精确，因此一般采用有限元数值计算的非线性磁参数法来校核计算结果。

4.7 损耗计算

4.7.1 绕组铜损耗

绕组铜损耗可用下式计算

$$P_{Cu}=qI^2R \tag{5.9-42}$$

在进行铜损耗计算时，最困难的是电流有效值的确定。如果已知电流仿真波形，则可以利用数值积分法计算

$$I=\sqrt{\frac{N_r}{2\pi}\int_{\theta_{on}}^{\theta_p}i^2(\theta)\,d\theta} \tag{5.9-43}$$

如果电磁设计是采用近似非线性模型为基础，用50%占空比的矩形波电流代替实际电流波形，则已知矩形波电流幅值后可以用下式估算

$$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}} \tag{5.9-44}$$

式（5.9-41）在斩波运行时较接近实际情况，误差较小。在角度位置控制运行时，绕组电流波形可近似为三角形，电流有效值可用下式估算

$$I=\frac{I_m}{\sqrt{3}} \tag{5.9-45}$$

电动机的几何尺寸一定时，其铜损耗正比于电负荷 A 和电流密度 J 的乘积。对一定的输出转矩，电动机电负荷的取值范围不大。所以为了减少铜损耗，电流密度不能取大。另外，为了避免电动机温升过高，A 与 J 的乘积不能超过一定限度。根据这个限制与 A 的取值范围，可以推算出

电流密度取值范围。对 B 级绝缘的开关磁阻电动机，可选

$$J = 4 \sim 6.5\text{A/mm}^2 \tag{5.9-46}$$

4.7.2　铁心损耗

由于开关磁阻电动机的双凸极结构，通电的电压、电流都是非正弦脉冲波形，电流、磁通波形与转速和控制策略有关，而且开关磁阻电动机铁心各部分磁通波形的形状和变化规律也不一致，因此开关磁阻电动机的铁心损耗计算十分困难。下面介绍两种估算开关磁阻电动机铁心损耗的方法：

1）实验的方法。根据理论分析，推导出电动机在额定运行情况下，铁心各部分的磁通典型波形和频率，再利用双绕组爱普斯坦仪的帮助以某种方式励磁，以便产生模拟实际磁通波形的双向的或单向的开关磁阻电动机内的磁通波形，测出每千克的铁心损耗和磁通密度的关系曲线 $P_{Fe} = f(B)$，利用这些曲线来计算开关磁阻电动机的铁心损耗。

2）傅里叶级数分解法。首先计算出额定运行情况下各部分的磁通波形和频率，再利用傅里叶级数分解法，计算出各段磁路各次谐波的磁通密度幅值 B_n，然后利用传统电动机铁心损耗的计算公式计算出各段磁路的各次谐波产生的铁心损耗，总加起来，就是开关磁阻电动机在额定运行情况下的铁心损耗。关于具体计算公式可参考有关文献。

5　功率变换器设计

根据基本工作原理，可知功率变换器的作用有三个：起开关作用，使绕组与电源接通或断开；为绕组的储能提供回馈路径；为开关磁阻电动机提供电能量，以满足所需机械能的转换。它的输入端与电池或整流器等直流电源相连，输出端与开关磁阻电动机各相绕组相连。开关磁阻电机驱动系统的成本主要取决于功率变换器，因此合理设计功率变换器应从与电动机结构匹配、效率高、控制方便、结构简单、成本低等基本要求出发，一个理想的功率变换器主电路结构应当满足如下要求：

1）在任何速度下，均能给相绕组提供充分大的励磁电压，以迅速建立相电流。

2）能给相绕组提供尽可能高的退磁电压，以迅速释放绕组磁场能量。

3）开关器件的电压定额与供电电源电压接近。

4）对电机相数没有限制。

5）能通过对主开关器件的控制，有效地控制相电流。

6）对有相电流重叠的电动机，能提供各相电流的独立控制。

7）开关 / 相数比低。

5.1　主电路拓扑结构设计

主电路的拓扑结构设计是开关磁阻电机驱动系统的功率变换器设计的关键之一，根据回收绕组释放磁场能量的方法不同，已经出现多种不同的主电路结构形式，如不对称半桥电路、双绕组功率变换器、带储能电容的功率变换器、Miller 功率变换器、再生式功率变换器等，其中具有代表性的 3 种电路拓扑结构如图 5.9-13 所示。

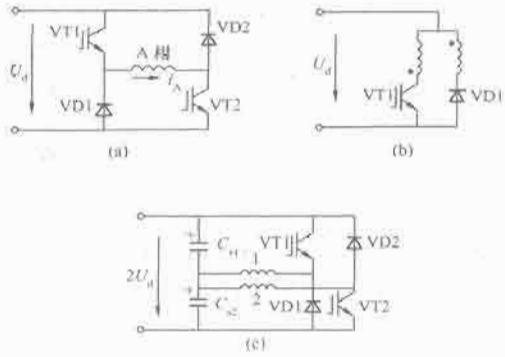


图 5.9-13　开关磁阻电动机主电路的形式

（a）不对称半桥型电路；（b）双绕组型电路；（c）分裂电源型电路

图 5.9-13（a）是不对称半桥型电路，每相有两只主开关 VT1、VT2 及续流二极管 VD1、VD2。VT1、VT2 导通时，绕组所加电压为 U_d；关断其中一只主开关器件进行零电压续流时，绕组所加电压为零；VT1、VT2 同时关断，绕组电流通过 VD1、VD2 续流时绕组电压为 $-U_d$。由于开关器件 VT 及二极管 VD 的最大反电压为 U_d 以及接通、关断时的电压突变，器件的电压定额选为 $2U_d$。这种电路主要优点是开关器件的电压容量要求较低；缺点是开关器件数目多。在高压和大功率场合应用时，优点尤为明显。

图 5.9-13（b）是单电源双绕组型电路，电动机每相有完全耦合的通电绕组（主绕组）及续流绕组（副绕组），它们同名端反接。每相仅有一只开关器件 VT 和一只续流二极管 VD，VT1 导通时通电相绕组电压为 U_d，VT1 关断后通电绕组中的磁场储能由其耦合的副绕组使 VD1 导通而续流将磁场储能吸收返回电源，相当于绕组电压为 $-U_d$。在开关器件 VT 上的电压为 $2U_d$，器件的电压定额选为 $4U_d$。这种电路的缺点是电动机与功率变换器之间的连线较多，电动机绕组利用率降低，优点是开关器件比图 5.9-13（a）减少一半。

图 5.9-13（c）表示由裂相电源供电的电路，每相只有一个开关器件和一个续流二极管。这种电路的相数应为偶数，以便使上下两个电源工作对称。当上臂导通时，电流经 VT1、绕组 1 和上半部电源流通，加到绕组 1 上的电压是电容 C_{d1} 两端的电压 U_d；当 VT1 关断后，绕组 1 中的电流经过下半部电源和二极管 VD1 流通，这时加在绕组 1 两端的电压为 C_{d2} 两端的电压 $-U_d$。在这种电路中器件正常工作的最大反压为 $2U_d$，由于通断时的电压突变，一般主开关器件的电压定额选为 $4U_d$。

5.2　功率变换器的容量

功率变换器所需容量有两种确定方法：

1）由峰值电流和峰值电压确定。主要适用于晶体管作为主开关器件的功率变换器。当一相只有一个开关器件［见图 5.9-13（b）和图 5.9-13（c）］时，每个器件上的峰值电压为（2～4）U_d；当每相有两个开关器件［见图 5.9-13(a)］时，每个器件上的峰值电压为（1～2）U_d。因此，这两种电路的功率变换器的容量（VA）为

$$S = (2 \sim 4)qU_d i \tag{5.9-47}$$

式中，i 为峰值电流。

2）由有效值电流和峰值电压确定。对于选用晶闸管的功率变换器，用有效值比峰值电流更有意义，这时，功率变换器容量（VA）为

$$S = (2 \sim 4)qU_d I \tag{5.9-48}$$

式中，I 是开关磁阻电动机相绕组的电流有效值。式（5.9-47）和式（5.9-48）中，前面系数 2～4，究竟选多少与开关器件的质量、参数以及缓冲电路有关。

5.3　开关器件的选择

开关磁阻电机驱动系统功率变换器主开关器件的选择与电动机的功率等级、供电电压、峰值电流、成本等有关；另

外还与主开关器件本身的开关速度、触发难易、开关损耗、抗冲击性，耐用性、并联运行的难易性、峰值电流定额和有效值（或平均值）电流定额的比值大小及市场普及性等有关。可供选择开关管类型有普通晶闸管 SCR，门极关断（GTO）晶闸管、电力晶体管（GTR）、功率场效应晶体管（MOSFET）、绝缘栅双极晶体管（IGBT）等。

随着半导体器件的迅速发展，目前应用于开关磁阻电机驱动系统的功率开关管，以 MOSFET 和 IGBT 最广泛。它们都是电压控制器件，都具有驱动功率小、驱动电路简单、安全工作区宽等优点。

5.4 辅助电路

功率变换器除主电路外，还有一些辅助电路，其作用是保证主开关器件能正常、高效工作。如驱动电路、吸收电路（缓冲电路）和过电压、过电流保护电路等。

5.4.1 驱动电路

驱动电路的功能是接收控制器输出的控制信号，经处理后将驱动信号输给开关器件、控制开关器件的开通和关断状态，驱动电路的结构取决于开关器件的类型、主电路的拓扑结构和电压电流等级。具体来说，开关器件的驱动电路接收控制器件输出的微弱门电平信号，经处理后给开关器件的控制极（门极或基极）提供足够大的电压或电流，使之立即开通。此后，必须维持通态，直到接收关断信号后立即使开关器件从通态转为关断态，并保持关断态。

在很多情况下，需要对控制器和主电路之间进行电气隔离，它可以通过脉冲变压器或光耦合器来实现。此外，还可以采用光纤传导替代信号的空间传导，由于不同类型的开关器件对驱动信号的要求不同，对于半控器件（SCR 和双向晶闸管）、电流控制型全控器件 GTO、BJT 和电压控制型全控器件（P－MOSFET、IGBT、MCT 和 SIT）等有着不同电路，一般说来，各种驱动触发器都已集成化、系列化，可供研制者选用。

5.4.2 缓冲（吸收）电路

半导体开关器件工作中有开通、通态、关断、断态四种工作状态。断态时可能承受高电压但漏电流小；通态时可能承载大电流，但管压降小；而开通和关断过程中开关器件可能同时承受过电压、过电流、过大的 du/dt、di/dt 以及过大的瞬时功率 $P=ui$。若不采用防护措施，高电压和大电流可能使主开关器件工作点超出安全工作区而损坏器件，因此半导体电力开关器件常设置开关过程的保护电路，也称缓冲电路，以防止瞬时过电压、过电流，消除过大的电压、电流变化率，减少开关损耗，确保器件处于安全工作区。缓冲电路还可以维持串联连接的开关管电压均衡，或维持开关器件并联时电流均衡。缓冲电路的拓扑结构取决于开关器件的类型和对功率变换器的要求。

6 控制系统

开关磁阻电机驱动系统的控制器是整个开关磁阻电机驱动系统的核心部分，它是由硬件和软件两部分组成，它的性能好坏直接影响着整个系统的性能高低，为了使系统正常运行，开关磁阻电机驱动系统的控制器一般需完成以下主要功能：

1）实现电流斩波或电压 PWM 斩波控制。

2）实现角度位置控制。

3）实现起动、制动、停车和四象限运行。

4）有完善的输入信号处理和输出信号处理的（硬件和软件）。

由于开关磁阻电机驱动系统是一个机电一体化产品，因此控制器的设计必须依据整体设计的分工，确定控制哪些参数，选用何种微处理芯片，用何种控制方法，哪些功能由硬件实现，哪些功能由软件实现等。

6.1 设计原则

1）保证由整体设计确定的所有功能实现。

2）确定电机在各种工况运行时的控制方式。

3）控制器的硬、软件设计时要具有可靠性、经济性和通用性。

6.2 控制原理

由第 3 节分析可知，为了保证开关磁阻电动机的可靠运行，一般在低速（包括起动）时，即在 $0\sim n_{fc}$ 的低速范围内，为了保证 Ψ 和 i 不超过允许值，必须采用可控条件。目前，一般采用电流斩波控制（简称 CCC）；在高速，采用角度位置控制（简称 APC）。下面分别叙述这两种控制的原理。

6.2.1 电流斩波控制（CCC）

低速运行特别是起动时，多采用斩波控制，以限制电流峰值。下面介绍三种电流斩波控制方法：

1）给定绕组电流上限值 I_{max} 和下限值 I_{min} 的斩波控制。控制器在绕组电流达到 I_{max} 时，关断主开关器件，并在电流衰减到 I_{min} 值后重新开通主开关器件，即通过开关器件多次导通和关断来限制电流在给定的上、下限值之间变化。在这种控制下，开通角 θ_{on} 和关断角 θ_p 可以改变，也可以固定不变，一般多采用固定不变。这种控制是通过改变电流上、下限值的大小来调节开关磁阻电动机输出转矩值，并由此实现速度闭环控制的。

2）给定绕组电流的上限值 I_{max} 和关断时间 t_1 的斩波控制。这种方式与给定绕组电流上限和下限斩波控制基本相同，不同之处是在关断主开关器件后，再次导通是由给定时间 t_1 来决定。

3）脉宽调制的斩波控制。一般在这种控制方式下，开通角 θ_{on} 和关断角 θ_p 固定不变。控制器在固定的斩波周期 T 内控制主开关器件的导通时间 T_1 和关断时间 T_2 的比例来改变绕组电流的幅值和有效值。

三种电流斩波控制方式下的电流波形如图 5.9-14 所示。

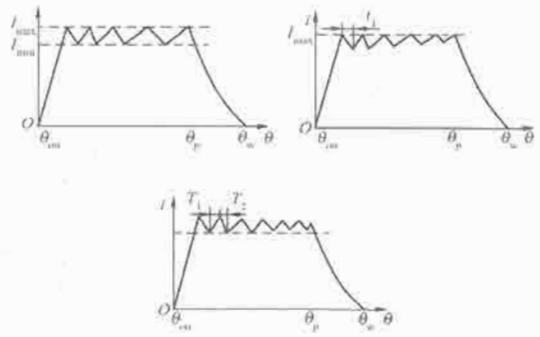


图 5.9-14 三种电流斩波控制方式的电流波形

6.2.2 角度位置控制（APC）

开关磁阻电动机在高速运行时，电动机转矩只能通过改变开关角 θ_{on} 和 θ_p 来调节，并由此实现速度闭环控制，即根据当前转速与给定转速 n_0 的差值自动调节电流脉冲的开通、关断位置，最后使转速稳定于 n_0。

在开关磁阻电机控制系统中，为实现 θ_{on} 和 θ_{off} 的调节，常采用专用硬件电路，构成数字式角度控制环节，其从反馈回路接受关于 θ_{on}、θ_{off} 的角度指令，再将此命令转化为与转子位置同步的主开关器件导通角，而导通角的大小是通过计数器对“角度时钟脉冲”的计数值来度量的，这种“角度时钟脉冲”的周期对应于转子某一固定的机械角，当转速发生变化时，虽然脉冲周期对应的时间相应发生变化，但所对应的转子转角却固定不变。

图 5.9-8 中电流波形就是在“角度位置控制”模式下产生的电流波形。

6.3　控制器的设计概述

开关磁阻电机调速系统原理图如图 5.9-15 所示。图中控制模式选择框是控制策略的总体现。它根据速度信号确定控制模式，电流斩波控制或角度位置控制。在电流斩波控制方式时，θ_{on}、θ_{off} 不变，即令换相逻辑控制单元自控式变频的固有模式确定各相的通断时刻，转矩指令 T^* 即可直接作为电流指令 i^* 输出。

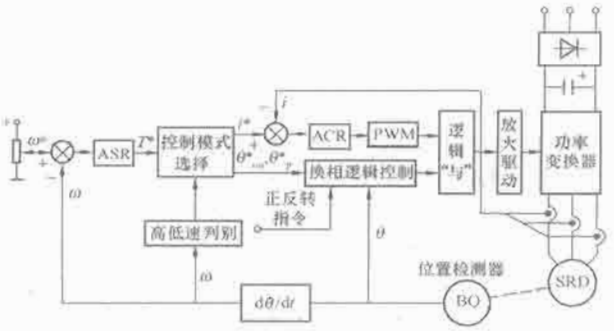


图 5.9-15　开关磁阻电机调速系统原理图

在角度位置控制方式时，把电流指令 i^* 给得很高，斩波不会出现，由转矩指令 T^* 的增、减来决定 θ_{on}、θ_{off} 的指令值 θ_{on}^*、θ_{off}^*，由 θ_{on}^*、θ_{off}^* 修正换相逻辑控制单元所确定的通、断时刻。

在电流斩波控制方式时，实际电流的控制由 PWM 斩波实现。PWM 的方法有多种，电流跟踪法（滞环比较）是最常用的办法。用电流跟踪法时，则不需要电流调节器 ACR，也可采用其他的 PWM 方法，如三角波与直流电压比较的方法。斩波控制时，由换相逻辑控制单元决定通断的大周期，由 PWM 单元确定真正通断的斩波时刻，经“逻辑与”后输出。

从这种双闭环控制结构可知，系统的闭环控制特性主要由控制电路决定。

从前面的控制原理分析可知，控制电路的主要功能就是利用控制给定信号（转速给定或转矩给定）和系统的反馈信号（电流反馈、转子位置反馈）等，完成一定的控制逻辑运算，最后为驱动电路提供各桥臂开关管的驱动信号。因此，控制电路的输入信号有给定控制信号、位置信号、电流信号、开停信号、各种保护信号等；输出信号有相触发信号、各种指示信号（触发、保护、正常工作、电动机转速等）。控制电路按功能划分可分为几个主要的部分：各种输入信号处理单元、位置检测单元、给定控制单元、控制模式选择单元、换相逻辑控制单元、电流控制单元以及各种保护与状态显示单元等。

早期的控制电路采用模拟电子电路构成，所有功能单元都是由硬件实现，所完成的控制功能比较简单，适用于对性能要求不高的场合。随着微电子技术的发展，微处理器在控制领域得到越来越广泛的应用。相继出现的各种高性能的单片机和 DSP 都被成功地应用在开关磁阻电机驱动系统的控制电路中，获得了较好的控制性能。其中比较有代表性的有 8051 单片机、8098 以及 80C196 系列单片机、AVR 系列单片机、TMS320LF2000 系列 DSP 等。

由于微处理器将越来越多的功能单元电路集成到其内部，使得绝大部分控制电路的功能都可以由控制软件来实现，因此系统具有很强的灵活性，为实现复杂的先进控制策略提供了可能。控制软件的设计对微处理器的硬件资源有很强的依赖性，但可以划分为主程序和完成各种功能的中断服务程序。其中，主程序主要实现程序初始化、起动过程、循环等待和一些对实时性要求不高的系统功能，如控制信号输入、状态显示、测速等；中断服务程序主要完成一些对实时性要求较高的系统功能，如功率保护中断、给定量的调节控制、电流检测、转子位置信号检测、换相逻辑判断、通信等。



图 5.9-16　硬软件设计流程

由于微处理器集成了大部分电机控制所需的功能单元电路，其外围只需添加少量逻辑电路、接口电路以及电源电路便组成了以微处理器为核心的控制电路的硬件部分。目前比较流行运用 CPLD 器件取代常规由分立元件构成的逻辑电路和接口电路的设计方法，使得控制电路的硬件结构更加紧凑、可靠性提高，升级维护成本降低。控制电路的主要控制功能在控制软件中实现。图 5.9-16表示以微处理器为核心控制电路的硬软件设计流程。

6.4　举例

下面以 TI 公司的 TMS320LF2407ADSP 为核心构成的控制电路为例来具体阐述控制电路的硬件、软件设计过程。

硬件设计以 TMS320LF2407ADSP 为核心，辅以相关逻辑电路和接口电路等，则构成了控制电路的硬件部分。目前比较流行运用 CPLD 器件取代常规由分立元件构成的逻辑电路和接口电路的设计方法，使得控制电路的结构更加紧凑，可靠性提高，升级维护成本降低。

输入信号中，位置信号一般为电平信号，可接至 DSP 的捕获端口；电流信号为模拟电压信号，由 DSP 的 AD 转换输入；而开停信号及各种保护信号可经 CPLD 或电路处理，使之成为开关型信号，由 DSP 的 I/O 口输入。输出信号中，相触发信号为开关信号，使用 DSP 的 PWM 口或 I/O 口输出；各种指示信号也为开关信号，可使用 DSP 的 I/O 口进行输出。

具体来讲，控制电路由 DSP、CPLD 和各种外围电路组成，控制电路硬件资源分配如图 5.9-17 所示。DSP 与 CPLD 构成了控制电路的中枢。外围电路主要包括外部输入电路、位置信号检测电路、电流检测电路、过电流检测电路、过电压和欠电压检测电路、时钟电路、系统复位电路、键盘及显示电路等。

CPU 选用 TMS320LF2407ADSP，这款 DSP 专用于电机数字控制，它集成了电机控制所需的大多数外围设备，设计时只需要外加较少的硬件设备，从而降低系统的硬件成本。DSP 综合处理速度指令、速度反馈信号、电流传感器、

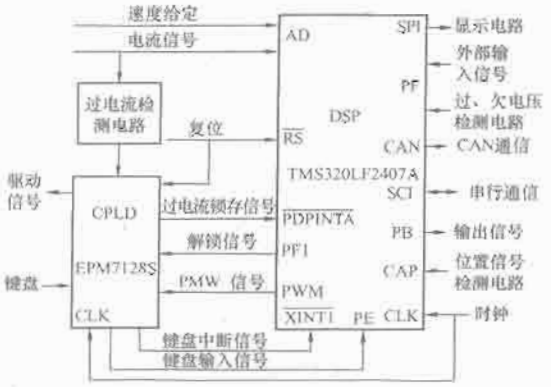


图 5.9-17 控制电路硬件资源分配

电压传感器及位置传感器的信息，实现速度的数字 PID 控制，给出电流斩波参考值，并通过电流滞环比较控制，控制功率变换器的开关器件的工作状态，实现对开关磁阻电动机运行状态的控制。DSP 资源利用如下：

1）位置信号检测电路三路信号：捕获单元（Capture Unit，CAP）。

2）三相电流检测电路及速度给定信号：数模转换模块（Analog-to-Digital Converter，ADC）。

3）电机超温信号、控制器超温信号、系统解锁信号、过电压信号、欠电压信号：IOPF 端口。

4）键盘信号：IOPE 端口。

5）PWM 输出信号：比较单元（Compare Unit）。

6）显示输出：串行外围设备接口模块（Serial Peripheral Interface，SPI）。

7）串行通信：串行外围设备接口模块（Serial Communications Interface，SCI）。

8）CAN（Controller Area Network）通信：CAN 控制器模块。

CPLD 选用 MAX7000S 系列的 EPM7128S，用它来替代分立逻辑芯片。CPLD 在开关磁阻电机驱动系统中可完成较复杂的逻辑运算，实现驱动信号的硬件保护，并且起提供输入、输出缓冲器的功能。CPLD 还起到扩展系统 I/O 口的功能，并且为控制系统今后升级或增加新功能，留下了开发的余地。

本控制系统的正常工作过程如下：

首先在外部输入给出起动信号，在检测系统状态一切正常的情况下，根据位置检测器提供的电动机转子位置信号，DSP 计算出电动机当前的转速和位置角信号。由电动机的转速，查表获得当前速度下的最优的开通角和关断角，根据当前的电动机位置角信号，DSP 给出相通断信号。根据当前转速速度环通过数字 PID 运算出电流斩波参考值，并采用电流滞环比较控制，综合相通断信号给出 PWM 信号。最后在 CPLD 中，综合 PWM 信号与过电流信号给出主开关的驱动信号。该驱动信号控制主电路向电动机绕组通电使电动机转动。当转子转过一定角度时，由 DSP 根据位置信号的变化使电动机通电相改变。若运行中出现故障，控制电路通过保护电路采取保护措施，并且通过显示电路显示故障信息。

软件设计：基于 DSP 的开关磁阻电机驱动数字控制系统的主要功能都是在 DSP 软件中实现。根据本系统的特点，将 DSP 的软件程序分为两个大部分，包括：

1）主程序。主要实现程序初始化、起动过程、循环等待和一些对实时性要求不高的系统功能，如控制信号输入、状态显示、测速等。

2）中断服务程序。主要完成一些对实时性要求较高的系统功能，如功率保护中断、电流或者转矩控制、电动机相电流的 AD 采样、转子位置信号的捕获、转子位置角的计算、换相逻辑判断、与显示电路的通信等。各个中断程序都有严格的响应条件、响应时间以及响应优先级。DSP 程序的总体的框图如图 5.9-18 所示。

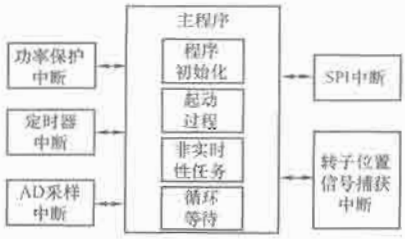


图 5.9-18 DSP 程序总体框图

7 反馈信号检测

7.1 位置检测

位置检测的目的是确定定、转子极的相对位置，即要用绝对位置检测器检测定转子相对位置，向单片机端口提供正确的转子位置信息，以确定对应相绕组的通断，使转子位置与绕组导通的相序很好地配合起来，以便实现设计所需的运行特性，同时也作为测量电动机转速的依据。

开关磁阻电机驱动系统对位置检测的要求，首先是在运行的速度范围内要满足检测的精度要求；其次是要求电路简单、工作可靠、抗干扰能力强；有的还要求能在恶劣环境下工作可靠。

实现位置信号的检测有两大类：①利用位置检测器检测位置信号；②无位置的检测器的位置检测技术。

常用的位置传感器有光敏式、磁敏式及接近开关。

下面介绍一种光电式位置检测器。它是由安装在底座上红外发光二极管和红外光敏晶体管及相关电路构成的光电传感部件和码盘组成，码盘有与转子凸极、凹槽数相等的齿和槽，且要求齿、槽宽度相等均匀分布，码盘固定在转轴上，光电传感部件主要完成位置信号处理、定转子相对角度细分的功能。可固定在定子或机壳上。

当码盘中凸齿转到开槽的光电传感部件中，光线被遮挡时，光敏晶体管截止；当开槽中无遮挡时，光线能够照射到光敏晶体管上，光敏晶体管饱和导通，通过适当的外接电路就可以把光敏晶体管电压高低的变化转化为转子位置信号。电动机旋转时，每只光电传感部件都可以经整形获得方波信号，方波周期为 $2\pi/N_r$。

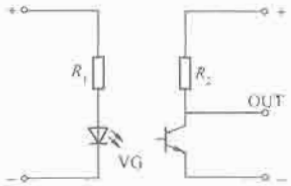


图 5.9-19 光电传感部件信号输入电路

位置检测方案有全数检测和半数检测方案两种。全数检测所用光电传感器件的个数等于电动机的相数 q；而半数检测方案所用光电传感器件的个数为相数的一半，即 $q/2$。图 5.9-19 给出光电传感部件信号输入电路。

7.2 相电流检测

开关磁阻电机驱动系统相电流检测是开关磁阻电动机电流斩波控制方式运行的需要，也是过电流保护的需要，精确

检测相绕组电流是必需的，因此，在开关磁阻电机驱动系统中电流传感器应具备如下性能特点：

1）产生正比于被测电流的信号。

2）快速性能好，抗干扰能力强，灵敏度高，有良好的线性度。

由于开关磁阻电机驱动系统的功率变换器输出的相电流量是单向脉动的，可用如下几种检测电流的方法，即

1）电阻采样。

2）直流电流互感器。

3）霍尔元件采样。

4）磁敏电阻采样。

电阻采样简单易行，但有附加损耗，且易引入主电路的强电干扰。图 5.9-20 为一个有光电隔离的电阻采样电流检测电路。

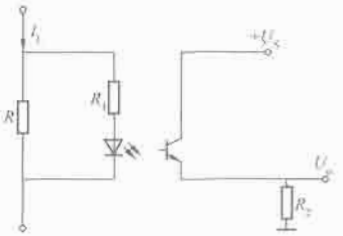


图 5.9-20　光电隔离线电阻采样电流检测电路

上述 2）、3）、4）种都是要进行被测电流转换为磁场的变换，相对电路复杂一些，磁场平衡式霍尔电流传感器（LEM 模块）是一种理想的电流传感器。

图 5.9-21 给出了 LEM 模块工作原理，LEM 模块通过磁场的补偿，铁心内磁通保持为零，致使其尺寸、重量减少，使用方便，电流过载能力强，整个传感器已模块化，已制成商品实现系列化。

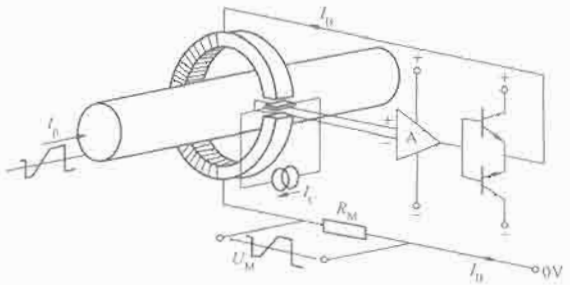


图 5.9-21　LEM 模块工作原理图

7.3　转速检测

开关磁阻电机驱动系统都有速度闭环，使电动机在设定的转速下运行。因此对电动机的瞬时转速要实时、快速检测，所测量到的转速值与设定转速值比较，将差值送入速度调节器作为调节控制参数的依据。

在开关磁阻电机驱动系统中，位置检测器是必不可缺少的。由位置检测原理可知，一相位置检测信号的频率为

$$f_1 = \frac{N_r n_r}{60} \tag{5.9-49}$$

式中，N_r 为转子极数；n_r 为转子的转速，r/min。

由式（5.9-49）可知，转子位置检测信号的频率与电动机的转速成正比，因此可以直接利用位置检测器提供的转子位置检测信号的频率转换成转速信息。一般而言，实现转速转换的方法可分为模拟式和数字式两种。

1）模拟测速法。这种方法主要用在一些装置采用模拟控制场合。典型的方法是利用频压转换器，把转子位置检测信号脉冲转换为电压信号。频压转换器有专用集成器件，如 LM2917 等。

2）数字测速法。开关磁阻电动机每转一圈位置检测器均会发出一定数量的位置脉冲信号，无论采用全数检测还是半数检测方案，将 q（或 $q/2$）的路位置传感器的输出信号经过简单的逻辑电路，即可得到步距角（$\theta_{step}=2\pi/N_r q$）脉冲信号，计数器记下在已知时间间隔内的步距内脉冲数，并送至 CPU，则可算出在这段时间为的平均转速。常见的数字测速法有三种：

①M 法测速。M 法测速是在相等的时间间隔内用读数步距角脉冲个数来算出转速，从而得转速的测量值，具体过程是：步距角 $\theta_{step}=2\pi/N_r q$ 脉冲信号由计数器计数，定时器每隔时间 T 向 CPU 发出一次中断请求，CPU 响应中断后，从计数器读出数值并立即将计算器清零。根据计数器读出的数值即可求出对应的转速测量。若时间 T 内共发出 m 个步距角脉冲，则转速按下式计算

$$n = \frac{60m}{p_N T} = \frac{30m\theta_{step}}{\pi T} = \frac{60m}{N_r q T} \tag{5.9-50}$$

式中，p_N 为每转的步距角脉冲数。

由式（5.9-50）可知，转速 n 与计数值 m 成正比，故称 M 法测速。M 法较适合高速运行时测速，低速时测速精度较低。

②T 法测速。T 法测速的原理是，测出相邻两步距脉冲之间的间隔时间计算转速的一种测速方法，间隔时间的测量可以借助一计数器对已知频率的时钟脉冲计数来实现。

具体来说，每输出一个步距脉冲，都通过微机接口向 CPU 发出一次中断请求，CPU 响应中断后，从计数器读出计数值并清零，由计数值即可算出转速。

设时钟频率为 f，两步距脉冲间的计数值为 m，步距脉冲周期为

$$T = m/f \tag{5.9-51}$$

转速

$$n = \frac{60}{T p_N} = \frac{60f}{p_N m} = \frac{60f}{N_r q m} \tag{5.9-52}$$

对比式（5.9-50）和式（5.9-52）不难看出 T 法测速与 M 法测速刚好相反，T 法较适合于低速测速。它的优点是低速段对转速的变化具有较强的分辨能力，可提高系统低速运行的控制性能。

③ M/T 法测速。M/T 法测速综合了 M 法和 T 法两种测速方法的特点，可在低速较可靠地测速，在高速段又有 M 法具备的较高分辨能力。其基本原理可用图 5.9-22 来说明。

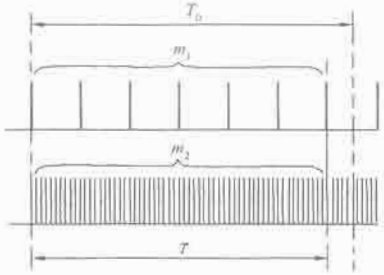


图 5.9-22　M/T 法测速原理

T_0 由一定时器定时固定，实际的测速时间（周期）T 是在时间 T_0 范围内最后一次发生捕获中断的时刻。设在 T（时间）内，开关磁阻电动机的转角 θ（rad）为

$$\theta = \frac{2\pi n_r T}{60} \tag{5.9-53}$$

若在 T 内发出的步距脉冲数为 m_1，则 θ 亦可表示为 $\theta=2\pi m_1/p_N$，又若在 T 内对频率为 f 的时钟脉冲的计数值为 m_2，则检测时间为

$$T=\frac{m_2}{f} \tag{5.9-54}$$

由式（5.9-53）和式（5.9-54），可以求出转速

$$n_r=\frac{60fm_1}{p_N m_2}=\frac{60m_1 f}{N_r q m_2} \tag{5.9-55}$$

由式（5.9-55）可以看出，这种方法要用两个计数器，在检测时间 T 内分别对位置信号脉冲和时钟脉冲计数，在时钟脉冲频率 f 已知的情况下可算出转速 n_r。

8 制动和发电运行

8.1 制动运行原理

根据第3节基本电磁关系的分析，在线性模型下，式（5.9-9）可写成

$$\pm u=Ri+L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+i\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta}\Omega \tag{5.9-56}$$

式（5.9-56）右端第一项是相绕组的电阻压降，第二项为变压器电动势 e_t，第三项为运动电动势 e_Ω。

$$e_t=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{5.9-57}$$

$$e_\Omega=i\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta}\Omega \tag{5.9-58}$$

当电压 u 为正，表示电源供电，若开关磁阻电动机每相绕组中的电流主要都在电感上升（即 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta>0$）区域存在，流过电动机产生正转矩 $T=\frac{1}{2}i^2\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta$，$e_\Omega=i\Omega\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta$ 为正值。这种状态是电能转换成机械能，电动机运行在电动状态，供电阶段输入的电能的主要部分以磁阻转矩做功的方式转变为机械能输出，另一部转换的磁场储能是在开关关断后以续流方式回馈电源。

若每相绕组的电流主要在电感下降区存在（不论是供电电流还是续流电流），由于 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta<0$ 为负值，产生负的磁阻转矩，即制动转矩。它与轴的负载转矩方向相反，可以达到限制或降速目的。上述情况产生在电源供电时，则电源输入的电能和外界输入的机械能均转换成磁场储能；若处在续流（主开关断开，续流二极管导通）时，则磁场储能转换为电能通过续流电流回馈到电源或通过外接制动电阻消耗掉，电动机运行在制动状态。

8.2 发电运行

8.2.1 工作原理

从8.1节可知，若由原动机拖动开关磁阻电动机旋转，电动机绕组主要在电感下降区域存在电流，这时续流的过程就是机械能转换成电能输出的过程，开关磁阻电动机处在发电运行状态。发电运行状态的特点是式（5.9-56）左端电压取负值，右端第三项 $e_\Omega=i\Omega\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta$ 为负值，$\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta$ 为负值，由原动机克服开关磁阻电动机的磁阻转矩输入机械能。可以看出，开关磁阻电动机与其他传统电动机不同，运动电动势的产生，是与绕组电流和电感随转角的变化有关。与感应电动机类似，开关磁阻电动机是一个单边单励磁系统，因此，在发电运行之前需为电动机提供初始励磁电压，为电动机能够自励创造条件，即建立运动电动势。在原动机拖动有运动电动势的条件下，只需要在相应电感下降区存在绕组电流，就会产生负转矩，进入发电运行状态。

因此，开关磁阻电动机发电运行时，一般在接近电感最大值 L_{max} 附近，主开关器件导通，由励磁电源励磁产生必要的励磁电流和运动电动势，然后，断开开关，进入续流阶段，实现开关磁阻电机发电运行。

8.2.2 发电运行时的控制

由式（5.9-56），在忽略相绕组电阻的情况下，电压方程式可写为：

电感上升区，加正电压

$$L(\theta)\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=|u|-i\left|\frac{\mathrm{d}L(\theta)}{\mathrm{d}\theta}\right|\Omega \tag{5.9-59}$$

电感下降区，加负电压

$$L(\theta)\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=-\left(|u|-i\left|\frac{\mathrm{d}L(\theta)}{\mathrm{d}\theta}\right|\Big/\Omega\right) \tag{5.9-60}$$

若以定转子齿极中心线对齐位置为对称轴线，比较式（5.9-59）和式（5.9-60），只要适当的控制，就可以做到发电运行状态下的电流波形与电动运行状态下的电流波形完全对称。图5.9-23表示低速斩波控制方式下的电动机的相电流波形。图5.9-24表示高速角度位置控制控制方式下，电动机的相电流波形。

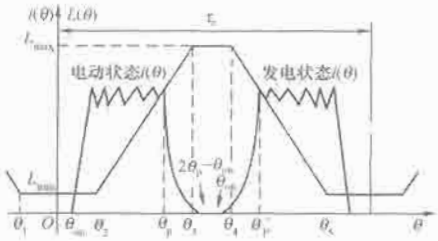


图5.9-23 电动发电电流斩波控制时电流波形对称示意图

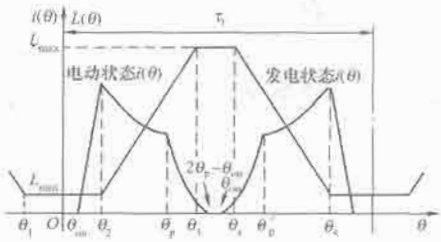


图5.9-24 电动发电角度位置控制时电流波形对称示意图

发电运行状态的控制参数与电动状态一样，有 θ_{on}、θ_p、i 和电压 U_0。控制方式也类似，它的主要控制特点是：

1）在非零的整个速度范围内，只要采用适当的控制方法，开关磁阻电动机的发电性能可以做到与电动性能完全一样（实际中由于绕组电阻影响，发电性能略差于电动性能）。

2）开关磁阻电动机低速发电运行时，满足 $|u/\Omega|\geqslant\left|\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta}i_0\right|$，$i_0$ 为起动励磁电流，电流可以斩波控制，电流可控。高速运行时，$|u/\Omega|<\left|\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta}i_0\right|$，角度位置控制，电流不可控，但到最小电感区，$\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta=0$，运动电动势为零，电流必定下降，电流最大值可以预估。

3）开关磁阻电动机传统二态输出的电流滞环控制，不可用于发电运行状况。

9　特种开关磁阻电动机

9.1　全距绕组排列的开关磁阻电动机

9.1.1　概述

图 5.9-25 为一常规 3 相 6/4 极开关磁阻电动机截面图，每个定子齿极上套有一集中绕组，因它只交链一个齿极，故又称短距绕组。图 5.9-26 表示 3 相 6/4 极的全距绕组排列的开关磁阻电动机截面图，它有 3 个 A_+A_-，B_+B_-，C_+C_- 全距绕组，每个绕组交链三个齿极（$N_r/2$），全距绕组排列的开关磁阻电动机除绕组排列不同外，其他结构与常规的开关磁阻电动机相同。提出此种结构的目的，在于试图提高每相绕组磁动势和磁场的利用率，下面的分析是在线性模型条件下进行的。

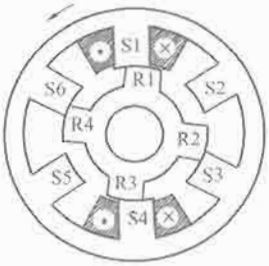


图 5.9-25　6/4 开关磁阻电动机截面图

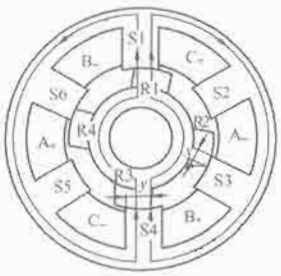


图 5.9-26　6/4 全距绕组排列的开关磁阻电动机截面图

9.1.2　全距绕组开关磁阻电动机的工作原理

对于图 5.9-26 所示转子位置，B、C 两相通电（每相导通时，电流方向为头进尾出），将建立如图 5.9-26 所示的磁场，对转子齿极 R1、R3 产生磁拉力，转子逆时针旋转。当 R1、R3 的中心线接近 S1S4 中心线时，改为 C、A 两相通电，将对齿极 R2、R4 产生磁拉力，转子继续逆时针旋转，然后 A、B 两相导通，对齿极 R1、R3 产生磁拉力。若按 B、A 通电→A、C 通电→C、B 通电→B、A 通电的通电顺序，则全距绕组排列的开关磁阻电动机顺时针旋转，可见全距绕组开关磁阻电动机正、反转控制方便。图 5.9-27 表示全距绕组排列的开关磁阻电动机的各相绕组通电顺序。

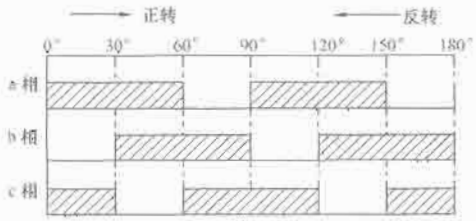


图 5.9-27　全距绕组排列的开关磁阻电动机各相电流导通图

由以上分析可见，全距绕组排列的开关磁阻电动机在任何时刻，有两相绕组导通，与传统短距绕组开关磁阻电动机比较，铜材料的利用率得到提高。

9.1.3　全距绕组排列的开关磁阻电动机自感、互感及电磁转矩分析

以 3 相 6/4 结构为例，开关磁阻电动机的电磁转矩为

$$T=\frac{1}{2}i_a^2\frac{\partial L_a}{\partial\theta}+\frac{1}{2}i_b^2\frac{\partial L_b}{\partial\theta}+\frac{1}{2}i_c^2\frac{\partial L_c}{\partial\theta}+\frac{1}{2}i_ai_b\frac{\partial M_{ab}}{\partial\theta}+i_bi_c\frac{\partial M_{bc}}{\partial\theta}+i_ci_a\frac{\partial M_{ca}}{\partial\theta}\quad(5.9\text{-}61)$$

对于全距绕组排列的开关磁阻电动机，每相的自感 L_a 为

$$L_a=L_\sigma+\mu_0\frac{N^2lg\beta_L}{2g}\quad(5.9\text{-}62)$$

式中，L_σ 为每相的漏自感；l 为电动机的轴向长度；g 为气隙长度；$\beta_L=x+y$（如图 5.9-26 所示）；N 为绕组匝数；μ_0 为空气磁导率。

显然，在假定定、转子齿极宽相等的条件下，$x+y=\beta_s$，因此，全距绕组排列的开关磁阻电动机旋转时，不管转子在什么位置，$\beta_L=x+y=\beta_s$，为常数，故 L_a 为一常数，其值为开关磁阻电动机定、转子齿极对齐时的电感值 L_{max}。

类似于自感的分析方法，可以写出全距绕组排列的开关磁阻电动机的互感表达式（以 A、B 相的互感为例）。

$$M_{ab}=\mu_0\frac{N^2lg\beta_M}{2g}\quad(5.9\text{-}63)$$

式中，$\beta_M=x-y$。

β_M 随转子位置不同而发生变化，因此全距绕组排列的开关磁阻电动机的互感是一个随转子位置变化的函数，全距绕组排列的开关磁阻电动机在理想线性模型情况下自感、互感随转子位置变化曲线如图 5.9-28 所示。

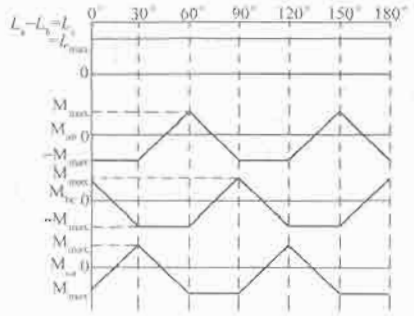


图 5.9-28　$L(\theta)$、$M(\theta)$ 曲线

在任何时刻，如果是两相同时导通（例如 A、B 两相导通），则电磁转矩由式（5.9-61）可得

$$T=i_ai_b\frac{\partial M_{ab}}{\partial\theta}\quad(5.9\text{-}64)$$

由开关磁阻电动机和全距绕组排列的开关磁阻电动机的电感公式可以得到它们的自感和互感随转子的变化率。对于理想线性化模型，全距绕组排列的开关磁阻电动机互感变化率是开关磁阻电动机自感变化率的两倍。故理论上讲，全距绕组排列的开关磁阻电动机的输出转矩是开关磁阻电动机的两倍，这表明全距绕组排列的开关磁阻电动机可提高电动机的效率。

9.2　加辅助绕组的开关磁阻电动机

以 3 相 6/4 极为例，图 5.9-29 表示一加辅助绕组的开关磁阻电动机，绕组 D 称为辅助绕组或换向绕组，它与 A、B、C 3 个齿极都交链，绕组 D 可以根据要求单独电源供电，电压可正、可负，也可自身短路，辅助绕组 D 与 A、B、C 各相绕组相当于变压器一、二次绕组的关系，因此可利用变压器等效电路来分析。由于辅助相绕组与其他各相绕组有紧密的耦合，它自身的自感不随转子位置变化，是一个常数的特点，加了辅助绕组后可以改善开关磁阻电动机主绕组的换向性能，因此可以增加导通角，提高电动机出力。在主绕组断开时（θ_0 时），绕组电流

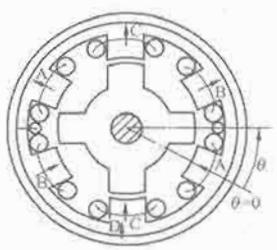


图 5.9-29　加辅助绕组的开关磁阻电动机示意图

迅速下降到零，它的磁场能量变化到辅助绕组，并且由辅助绕组将此部分磁能转换成机械能输出或将此能量转到下一开通相。

10 单边双励磁的双凸极电动机

10.1 永磁式双凸极电动机

图 5.9-30 表示 3 相 6/4 极永磁式双凸极电动机的结构。它与 3 相 6/4 极开关磁阻电动机相比，区别主要在于定子轭部对称地嵌入两块永磁体。

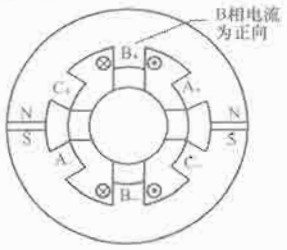


图 5.9-30 3 相 6/4 极永磁式双凸极电动机示意图

按照第 3 节的同样分析方法，可知：

1）由于永磁体的外磁路气隙与转子位置无关，为一常数，所以永磁体的工作总磁通基本不变，它的自感 L_m 为常数，永磁体与各相绕组的互感磁路与各相绕组自感磁路相同，也是随转子位置变化的，是 θ 的函数。

2）各相绕组的自感 L_w 由于永磁体嵌在定子轭磁路上，增大了绕组磁通回路的磁阻，因此在定转子齿极对齐和定子齿极对转子槽位置，绕组的自感均较小。

3）一相绕组单独通电时，与绕组交链的磁链 Ψ 由永磁体产生的磁链 Ψ_m 及绕组通电产生的磁链 Ψ_w 两部分构成，即

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_w \tag{5.9-65}$$

$$\Psi_w = L_w i \tag{5.9-66}$$

磁共能为

$$W'_m = \int_0^i \Psi(i,\theta)\mathrm{d}i \tag{5.9-67}$$

因此，由式（5.9-65）～式（5.9-67）得到，永磁式双凸极电动机的电磁转矩表达式

$$T_{em} = \frac{\partial W'_m}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L_w}{\partial \theta} + i \frac{\partial \Psi_m}{\partial \theta} \tag{5.9-68}$$

由上面分析可以得到如下结论：

1）在永磁式双凸极电动机中，转矩 T_{em} 由两部分组成

$$T_{em} = T_s + T_{pm} \tag{5.9-69}$$

式中，T_s 是磁阻转矩，若相绕组电流为矩形波，则在一个开关周期中，平均磁阻转矩为零；T_{pm} 是由永磁体磁场与绕组电流作用产生的电磁转矩，这与传统的开关磁阻电动机完全不同，与同步电机相同。

2）永磁式双凸极电动机中，通过双凸极效应，实现安装在单边永磁体的磁场和绕组电流相互作用，产生感应电动势，实现电能与机械能的转化。

3）从 $T_{pm} = i\partial\Psi_m/\partial\theta$ 可以看出，永磁体产生的转矩的方向与电流方向和磁链变化方向有关，只有在各绕组的磁链上升区域绕组中通以正向电流（增磁作用）和在各相绕组磁链下降区通以负向电流（去磁作用）才能产生电动转矩。

10.2 具有直流励磁的双凸极电动机

图 5.9-31 表示具有直流励磁的开关磁阻电动机示意图，从结构上看与加辅助绕组的开关磁阻电动机相同，不过在具有直流励磁的双凸极电动机中直流绕组中一直通以使各相绕组增磁的正向电流，从工作原理上看与永磁式双凸极电动机相同，它的转矩由磁阻转矩和励磁电流产生的磁场与相绕组电流相互作用产生的电磁转矩两部分组成，在一个周期中，磁阻转矩平均值为零，电磁转矩是电动机输出转矩的主要部分，与永磁式双凸极磁阻电动机不同之处在于，具有直流励磁的双凸极电动机的绕组磁通的磁路与传统的开关磁阻电动机相同。

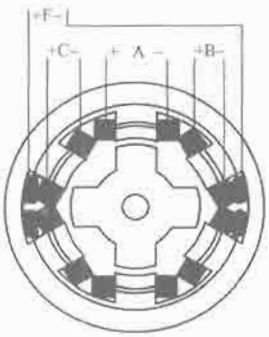


图 5.9-31 直流励磁的开关磁阻电动机示意图

11 应用

在应用方面，各国学者将开关磁阻电机驱动系统与各类调速系统，特别是与已经得到广泛应用的感应电动机变频调速系统就成本、性能、应用领域诸方面进行了大量的分析和比较，得出了共同的结论：开关磁阻电机驱动系统的主要性能可以与感应电动机变频调速系统竞争。P. JLawrenson 于 1983 年公布的研究成果，改变了长期以来人们普遍接受的双凸极磁阻电动机效率低，只能适合小功率应用的传统观念。随后，1993 年我国学者曾从理论上分析和证明了开关磁阻电动机的能量比在电流斩波控制和角度位置控制两种运行方式下都能超过 0.5 的原因，使人们对机电能量转换中这一根本问题有了新的认识。

经过国内外科技工作者 20 余年的努力，开关磁阻电机驱动系统得到了迅猛地发展，不仅生产出了通用型开关磁阻电机驱动系统产品（供一般工业用，如风机、泵等），而且深入到机床、电动车驱动、家用电器、矿采、石油、航空工业和建材工业等广阔领域，取得了越来越显著的经济效益。目前，开关磁阻电动机的开发范围如下：转矩为 $0.01 \sim 10^6$ N·m，功率为 $0.01 \sim 5\times10^8$ W，转速为 $50 \sim 10^5$ r/min；规格包括单相、两相、三相和三相以上；结构型式包括径向磁路的旋转型、轴向磁路的旋转型以及直线型。

由于开关磁阻电动机独特结构和性能以及节能效果，在市场应用前景将是十分广阔的，如：①高速驱动领域；②在 1500～1800r/min 内与传统感应电动机市场对应的领域；③在 750～3000r/min 内与传统直流电动机市场对应的领域；④低速驱动系统；⑤需要频繁起停及正反方向转换运行的工作领域。尤其是开关磁阻电动机的各相绕组和磁路相互独立，各自在一定转角范围内产生电磁转矩，而不像在一般电动机中必须在各相绕组和磁路共同作用下产生一个旋转磁场，电动机才能正常运转。从控制器结构上看，各相电路各自给一相绕组供电，一般也是相互独立工作，当电动机一相绕组或控制器一相电路发生故障时，只需停止该相工作，电动机除总输出功率能力有所减小外，并无其他妨碍。由此可知，开关磁阻电机驱动系统是一个可靠性极高的系统，可以适用于宇航等特殊场合。

11.1 在电动车辆中的应用

交通运输车辆的驱动系统，其要求较为复杂多样，既包括高速驱动，又包括低速驱动，同时又频繁起停及正反向转换运行，要有极高的可靠性，开关磁阻电机驱动系统正好能够满足这些要求。因此，开关磁阻电机驱动系统也较早试用于交通运输车辆中。

英国的开关磁阻电机驱动系统公司研制的 30kW 开关磁阻电机驱动系统已于 20 世纪 90 年代用于部分市内有轨电车；50kW、180V 开关磁阻电机驱动系统则试用于 7.5t 城市载货电动车。

美国的 Dana 汽车系统集团对于开关磁阻技术中心十分重

视。其高端产品开发主管 John Hickey 说道：除了上述提及的优点外，还应注意到开关磁阻电动机易于冷却的特性，原因是其转子没有产生热量。而且一台开关磁阻交流发电机可在汽车怠速时产生更多功率。相比于交流同步和无刷直流电机，开关磁阻电机还有一些其他的独特特性，例如开关磁阻起动器/交流发电机，它们的效率可高于目前交流发电机 40%。其他的应用，如电子转向系统和涡轮增压机的进步将越来越适合开关磁阻系统的发展。Hickey 指出，虽然开关磁阻技术在汽车行业的应用还处于幼年时期，但前景是令人鼓舞的。

在我国，于 1995 年研制出 20kW 开关磁阻电机驱动系统驱动的纯电动车；1999 年研制成功轿车概念车用 20kW 的开关磁阻电机驱动系统；“十五”期间试制成功的 100kW 和 60kW 两种规格的开关磁阻电机及其控制系统均已装车运行。通过改进，控制器的体积和重量大大减少、成本大大降低，也大大提高了系统的可靠性。特别是电机噪声指标获得极大改善，电机噪声完全淹没在发动机噪声之中，可与感应电机系统媲美。其他力能指标和控制结构都满足了整车厂要求。

此外，开关磁阻电机驱动系统还在其他类型的电动车辆中也开始得到广泛应用，如：

1）电动自行车和电动摩托车。

2）景区观光车。

3）儿童娱乐车。

4）保安车。

5）高尔夫车。

6）割草和草皮护养车。

7）微型轿车。

8）风景区游览用船舶（对湖泊的环保大有益处）等。

11.2　在矿山开采领域中的应用

开关磁阻电机驱动系统因其起动转矩大，起动电流小，可以频繁重载起动，无需其他的电源变压器，节能，维护简单，特别适用于矿井输送机、电牵引采煤机及中小型绞车等。国外公司早就将开关磁阻电机驱动系统用于采煤机、传动带机、破碎机等井下机械，20 世纪 90 年代英国的 BJD 等公司已研制成功 300kW 的开关磁阻电动机，用于刮板输送机，效果很好。我国北京中纺锐力机电有限公司等企业已研制成功 110kW 的开关磁阻电动机用于矸石山绞车，132kW 的开关磁阻电动机用于带式输送机拖动，同时还将开关磁阻电动机用于采煤机牵引，运行试验表明新型采煤机性能良好。

开关磁阻电动机驱动系统用于煤矿机械主要具有以下优点：

1）电动机结构简单，基本上免维护，只需对定子冷却，易做成防爆水冷结构。

2）电动机起动电流小，仅为额定电流的 30%，特别适合在供电线路较长的矿井下使用。

3）电动机起动转矩大。当起动电流为 30%额定电流时，起动转矩为 150%额定转矩；若对电动机及控制器进行特殊设计，起动转矩更可达 200%额定转矩，如采煤机、传动带机均十分需要这个特性。

4）开关磁阻电机调速系统较容易实现四象限运行。

5）电动机及控制器结构均比较简单，适于煤矿恶劣的工作环境。

11.3　在石油开采中的应用

我国石油抽油机每年更新及新装机约 1 万台，现大多数油田仍采用老式游梁式抽油机，能耗较大，电费支出占石油开采成本的 25%之多，且冲程冲次调节十分不便。国内油田开采的高成本使其很难适应国际竞争，降低能耗是当务之急，因此急需开发高效节能型抽油机。由开关磁阻电机调速系统配套的新型摩擦换向式抽油机由电动机换向直接带动油杆上升及下降，极大地简化了传动机构，使整体效率大大提高。

开关磁阻电动机用于新型抽油机，具有以下优点：

1）转速连续可调，调节范围大（可达 1∶20），调节十分方便，只需调节电位器即可完成，因此能改变抽油机的冲程冲次，适应各种情况。

2）起动电流小，转矩大，适合频繁换向。

3）功率因数高，对电网无污染，不需无功补偿。

4）效率高，节能明显，可比游梁式抽油机节能 30%以上。

5）电动机免维护，适用野外恶劣环境。

11.4　在机械制造设备领域中的应用

开关磁阻电动机驱动系统起动性能好，能四象限运行，具有较强的再生制动能力，很适于频繁起动的机械设备（如龙门刨床、铣床、锯切机等）和空压机械、冶金设备等领域。

1）美国 AMETEK 公司生产的开关磁阻空气压缩机（Vacuum 开关磁阻 Motor）应用于机车、飞机和厂房等重要场合，收到了良好效果。

2）贵州水城钢铁集团公司 3 号烧结机 2005 年采用开关磁阻电机驱动系统作为驱动控制系统试车成功，功率为 30kW 额定转速为 1500r/min，转速波动小于 1%。节能效果非常明显，与原变频调速系统相比较：在负载情况下、转速为 400～600r/min 时，原变频器运行相电流为 28A，而开关磁阻电动机仅为 10A 左右。

3）深圳市同力高科技有限公司，2006 年初购买广州思达电子仪器有限公司生产的几台 1.5kW 开关磁阻电机驱动系统，安装于该公司的 J23-16 型开式可倾压力机上，该开关磁阻电机驱动系统有以下优点。

① 省电。开关磁阻电动机的用电量仅是感应电动机用电量的 70%，空载期间更为明显。

② 功率因数高。开关磁阻电动机控制器可根据不同转速、不同负载情况自动调整电动机所需电流的大小，当电动机处于空载状态时，电动机只是投入能维持所需转速的最小电流，其空载电流极小约为额定电流的 10%。而普通感应电动机空载电流大约是额电电流的 50%，当电动机负载时，控制器会根据不同的负载情况自动调整电流，负载越重，所投入的电流也就越大，避免了“大马拉小车的现象”。

③ 起动性好。起动平稳可靠，对电网无冲击。

④ 调速范围广，运行稳定，调速平滑，调速范围广，适用性强。

11.5　在家电及食品加工领域的应用

1）美国著名的 Emerson 公司生产的开关磁阻电动机于 20 世纪 90 年代末开始在 Maytag Neptune 洗衣机上应用，显示出以下优点：

①很低的洗涤速度。

②良好的衣物分布性。

③滚筒平衡性好。

④快速安全停机。

⑤软起动。

⑥电流限幅。

⑦最大速度高，低速转矩大。

③机械特性易调整。

⑤对水温、水流等易于智能控制。

在美国，还有人将开关磁阻电机驱动系统应用于地板磨光机，也取得了良好效果。

在我国，北京中纺锐力机电有限公司和江苏扬州中凌电机技术有限公司也分别于2000年左右研制出洗衣机用的开关磁阻电机驱动系统，目前正在试运行之中。

2）美国于早些年也已将开关磁阻电机驱动系统应用于食品加工机械中，其中SMALLFRY公司生产中的食物切片机和粉碎机，显现出其独特的优势：

①体积小。

②不烧电动机。

③没有或只有小的齿轮减速比。

④电动机外形设计灵活，适应性好（"扁平"或"细长"）。

⑤安全停机。

⑥速度离散可选或连续可调。

⑦易实现特殊要求的机械特性（软件编程）。

11.6 在航空机械中的应用

航空机械把高度的可靠性和坚固的耐用性，以及良好的容错性能放在首要地位，所有这些正是开关磁阻电机系统的独到之处。美国首先对开关磁阻电机驱动系统应用于航空领域做了积极探索，已开发出30kW、250kW不同规格的产品样机。例如，美国一家公司生产的航空燃气涡轮发动机采用30kW开关磁阻起动/发电机系统，额定电压为270V，发动机功率为1044kW(1400hp)，运行环境温度为−51℃～+125℃。起动运行时，电动机从零升速至26000r/min，8000r/min以下时为13.56N·m的恒转矩区，8000～26000r/min时为12.68kW(17hp)的恒功率区；发电运行时，电动机速度变化范围为27000～46850r/min，允许时速至52000r/min，额定功率为30kW时系统效率为80%。

11.7 国内部分产品技术数据

国内部分产品技术数据见表5.9-1～表5.9-3。

表5.9-1 中纺锐力公司开关磁阻调速电动机产品

技术数据 / 系列	品种	功率（kW）	电压（V）	控制方式	其他
通用系列	H型	2.2～30			
	L型	7.5～132			
	DT型	7.5～315		采用DSP芯片为核心的全数字高性能控制	
矿用系列	采煤机电系统	22～55×2	380，660，1140		电动、制动四象限工作
	提升运输用系统	7.5～400	380，660，1140		隔爆水冷/风冷
	电动矿车驱动系统	5.5～37×2	250，550		
派生系列	电动汽车主驱动	11～110	直流96～550		
	无梭织机主驱动	3，6	380		
	全自动家用洗衣机电机	0.25	单相220	转速范围120～900 r/min	

表5.9-2 广州思达电子仪器有限公司开关磁阻调速电动机型号

序号	型号	功率（kW）	电压（V）	额定转速（r/min）	调速范围（r/min）
1	SR71M2-4	0.37	220	1500	100～2000
2	SR80M1-4	0.55			
3	SR80M2-4	0.75			
4	SR90S-4	1.1			
5	SR90L-4	1.5			
6	SR100L-4	2.2	380		
7	SR100L2-4	3			
8	SR132S-4	5.5			
9	SR132L-4	7.5			
10	SRM-160M-4	11		1500	
11	SRM-160M-6			1000	
12	SRM-160L-4	15		1500	
13	SRM-180L-6			1000	
14	SRM-180M-4	18.5		1500	
15	SRM-200L1-6			1000	
16	SRM-180L-4	22		1500	
17	SRM-200L2-6			1000	
18	SRM-200L-4	30		1500	
19	SRM-225M-6			1000	
20	SRM-225S-4	37		1500	
21	SRM-250M-6			1000	
22	SRM-225M-4	45		1500	
23	SRM-280S-6			1000	
24	SRM-250M-4	55		1500	
25	SRM-280M-6			1000	
26	SRM-280S-4	75		1500	
27	SRM-315S-6			1000	
28	SRM-280M-4	90		1500	
29	SRM-315M-6			1000	

表5.9-3 中国江苏扬州中凌电机技术有限公司开关磁阻电机调速系统

开关磁阻电动机			控制器	
机座号	额定输出功率（kW）（转速1500～2000 r/min）	额定输出转矩（N·m）（转速100～1500 r/min）	型号	电源（V）
63	0.09	0.57	K1	单相～220±10%
	0.12	0.76		
71	0.18	1.15		
	0.25	1.59		
	0.37	2.36		
80	0.55	3.50	K2	三相～380±10%
	0.75	4.77		
90	1.10	7.00	K3	
	1.50	9.55		
100	2.20	14.00	K4	
	3.00	19.10		
132	5.5	35.00	K5	
	7.5	47.70		

第 10 章　低速同步电动机

1　概述

在许多自动化装置中，希望电动机输出较低转速，通常在电动机和被驱动机构的轴间装设减速器（如齿轮箱），将较高的电动机转速降低到负载实际需要的低转速，减速比很大时，还需要装设多级减速器。采用减速器会导致装置或系统结构复杂，质量和体积增大，机械损耗增加；减速器制造质量不高时，还会造成系统运行精度不高并产生噪声；在系统要求正反转、平稳和快速反应时，减速器还会增加系统惯量，影响系统性能。

20 世纪 60 年代起，开始研制不同原理、不同结构的低速电动机。目前比较常见的有滚切式低速电动机、谐波低速电动机和电磁减速式同步电动机。滚切式电动机把电动机和机械上的行星减速原理结合起来，在输出轴上得到低转速。谐波低速电动机把电动机与谐波减速器原理结合起来，从而得到低转速。电磁减速式同步电动机是利用电动机定、转子表面开槽引起气隙磁导变化而得到低转速的同步电动机，在 50Hz 工频电源下，可以直接得到 60r/min 或更低的转速。滚切式低速电动机和谐波低速电动机由于材料及制造工艺等原因，应用较少。在工程上应用较为普遍的是电磁减速式同步电动机。本章重点介绍电磁减速式同步电动机原理、结构、运行特性及设计要点。为了叙述方便，以下将电磁减速式同步电动机简称为低速同步电动机。

1.1　分类

低速同步电动机可以按照不同的方法进行分类。

按励磁方式可分为反应式（也称为磁阻式）和励磁式两大类，励磁式又可分为永磁式和电励磁式两种。

按照所采用的电源，可分为单相和多相（一般为两相或三相电源）低速同步电动机。单相低速同步电动机又可以分为电容裂相式和屏蔽式。

按照结构特点分为：定子上只有一套绕组和有几套绕组的低速电动机；定子上每个槽都放绕组的和只有部分槽中有绕组的低速电动机；叠片转子、实心转子和空心转子低速电动机等。

1.2　功能和特点

低速同步电动机是利用定、转子开槽后使气隙磁导发生变化的原理而工作的电动机。它具有以下特点：

1）结构简单，尤其是反应式低速同步电动机的结构非常简单，制造方便，价格便宜。

2）没有高速转动和容易磨损的部分，运转平稳，噪声低，工作可靠，使用寿命长。

3）起动、反转以及不同负载时的输入电流变化不大，对电源要求低，可以在需要频繁起动、停止和反转的工况下运行，长期堵转也不会烧坏。

4）起动、停止和反转的时间短，可以作为伺服电动机使用。

5）如果在交流绕组中持续地通以直流电流可以产生很大的自锁转矩，对于轴向励磁永磁低速电动机，即使在定子绕组不通电的情况下，也能产生一定的自锁转矩。

6）配以适当脉冲电流可以作为步进电动机使用。

7）瞬时转速稳定度高。

由于具有以上特点，低速同步电动机在许多自动化装置以及一般的工业设备中得到了广泛应用。

低速同步电动机的典型使用场合有自动测试设备、纺织机械、开关、电阻箱的远距离控制、医疗器械、微型胶卷扫描、造纸机械馈送系统、锅炉阻尼器控制、阀门自动控制、传动带转输带系统、射线扫描系统、天线转动驱动系统、包装机械、流量表控制系统、泵体驱动、同步传动带驱动、彩扩机等。

1.3　发展概况

低速同步电动机的品种很多，反应式和电励磁低速同步电动机发展较早，电励磁低速同步电动机由于结构复杂而应用不多。随着永磁材料相关技术的发展，永磁低速同步电动机得到了较快发展。目前国内外应用较为普遍、批量生产的是永磁低速同步电动机。

在国外，日本、美国等公司有永磁低速同步电动机系列产品。我国已生产的永磁低速同步电动机基本系列是 TYD 系列。永磁低速同步电动机的永磁材料早期多采用铝镍钴永磁，现改用钕铁硼永磁。

2　基本工作原理和结构

2.1　工作原理

2.1.1　反应式低速同步电动机工作原理

反应式低速同步电动机和一般反应式同步电动机（磁阻电动机）定子结构一样，内表面开有槽，槽内放置对称交流绕组。但转子结构上有较大差别，一般反应式同步电动机的转子大多做成凸极式，转子极数与定子绕组极数相同；而反应式低速同步电动机的转子一般做成圆柱体，转子外表面开槽，槽内无绕组。定、转子开口槽数满足以下关系

$$Z_2 = Z_1 \pm 2p \qquad (5.10\text{-}1)$$

式中，Z_1 为定子开口槽数；Z_2 为转子开口槽数；p 为定子绕组的极对数。

图 5.10-1 给出的是 $Z_1=12$，$Z_2=14$，$p=1$ 的反应式低

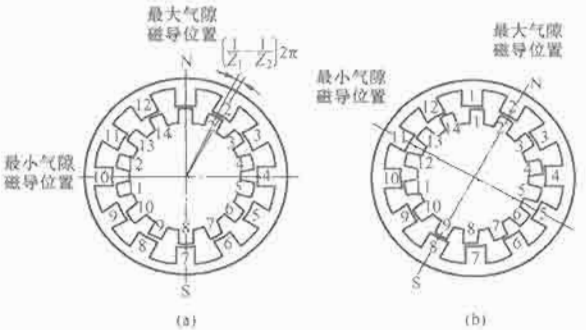


图 5.10-1　反应式低速同步电动机工作原理图
（$Z_1=12$，$Z_2=14$，$p=1$）

速同步电动机定、转子齿槽分布图。定子绕组通过交流电流时，将在电动机的气隙圆周空间产生定子旋转磁场。在图 5.10-1（a）所示的瞬间，定子旋转磁场的轴线与定子齿 1、7 的中心线对齐。根据“磁导最大原理”，此时转子齿 1、8 将试图与定子齿 1、7 的中心线对齐。当定子旋转磁场的轴线转过一个定子齿距而与定子齿 2、8 的中心线对齐时［见图 5.10-1（b）］，转子将在定子磁场的作用下转过一定的角度，试图使得转子齿 2、9 与定子齿 2、8 的中心线对齐。从图 5.10-1（a）到图 5.10-1（b）的过程中，定子旋转磁场转过的角度为一个定子齿距角即 $2\pi/Z_1$，而转子转过的角度为定、转子齿距角之差即 $2\pi(1/Z_1-1/Z_2)$。定子旋转磁场的转速（即同步转速）与转子实际转速的比值为

$$K_i=\frac{\frac{2\pi}{Z_1}2\pi}{2\pi\left(\frac{1}{Z_1}-\frac{1}{Z_2}\right)}=\frac{Z_2}{Z_2-Z_1} \qquad (5.10\text{-}2)$$

为了获得较大而稳定的电磁转矩，应该合理地选择定、转子的齿槽数，使得当定子磁场的 N 极轴线上定子齿［见图 5.10-1（a）中的定子齿 1］与转子齿正对时，相应的 S 极轴线上也应是定子齿［见图 5.10-1（a）中的定子齿 7］与转子齿正对；而在 N、S 极之间的几何中性线上，定子齿［见图 5.10-1（a）中的定子齿 4 和 10］应与转子槽正对。也就是说，在气隙圆周上半个极距内定、转子应相差半个齿，在 1 个极距范围内定、转子应相差 1 个齿，在整个气隙圆周上定、转子齿数差应等于定子磁场的极数即 $Z_2-Z_1=\pm 2p$，也即式（5.10-1）。

从气隙磁导波的角度来看，在图 5.10-1（a）所示瞬间，定子齿 1、7 下的气隙磁导最大，定子齿 4、10 下气隙磁导最小，在最大与最小位置之间，由于定子齿和转子齿逐渐错开，气隙磁导逐渐变小。图 5.10-2 给出了气隙磁导波 $\Lambda_\delta(x)$ 随转子转动的变化情况。实际电动机中气隙磁导波的分布曲线是比较复杂的，它包含有一系列的空间谐波。这里忽略了磁导高次谐波，而假定磁导波沿气隙圆周按正弦规律变化。

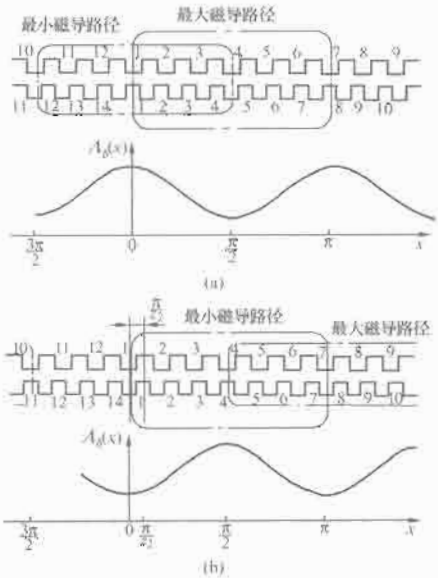


图 5.10-2 气隙磁导波与转子位置角的关系

图 5.10-2(a)对应于图 5.10-1(a)的瞬间，即转子齿 1、8 与定子齿 1、7 正对的瞬间，此时 $x=0$，$\Lambda_\delta(x)$的最高点位于 $x=0$ 处。图 5.10-2(b)表示转子转过半个转子齿距，即 $x=\pi/Z_2$ 的瞬间。此时定子齿 1 与转子齿 14、1 之间的槽正对，定子齿 4 与转子齿 4 正对，$\Lambda_\delta(x)$的最高点由定子齿 1 的中线移动到定子齿 4 的中线，移动了半个极距的角度，即移动到 $x=\pi/(2p)$ 处。不难看出反应式低速同步电动机的气隙磁导基波具有普通反应式凸极同步电动机的特征。其等效凸极数 $2p=Z_2-Z_1$，但普通反应式同步电动机的气隙磁导波与转子的转速相同，而反应式低速同步电动机气隙磁导基波的转速为转子转速的 $\frac{\pi/Z_2}{\pi/2p}=\frac{Z_2}{2p}=\frac{Z_2}{Z_2-Z_1}$ 倍。

将定子绕组设计为 $2p=Z_2-Z_1$，当转子的转速正好使得气隙磁导基波的转速与定子旋转磁场的转速相等时，就会产生同步转矩使电动机作为反应式低速同步电动机运行。这时真正与定子旋转磁场同步的是气隙磁导基波，转子的实际转速是定子旋转磁场转速的 $\frac{Z_2-Z_1}{Z_2}$ 倍。

当电源频率为 f 时，定子旋转磁场的转速 $n_1=60f/p$，因此反应式低速同步电动机的转速为

$$n=\frac{Z_2-Z_1}{Z_2}n_1=\frac{Z_2-Z_1}{Z_2}\frac{60f}{p}=\frac{120f}{Z_2} \qquad (5.10\text{-}3)$$

从以上分析可见，反应式低速同步电动机具有以下特点：

1）定、转子槽数必须满足 $Z_2-Z_1=\pm 2p$，其中 $Z_2>Z_1$ 时，转子旋转方向与定子旋转磁场的方向相同；$Z_2<Z_1$ 时，转子旋转方向与定子旋转磁场的方向相反。

2）气隙磁导基波的分布与一般反应式同步电动机相同。磁导基波沿气隙圆周变化的次数即等效凸极数为 Z_2-Z_1。

3）气隙磁导基波的转速与定子旋转磁场的转速相同。

4）转子的转速是气隙磁导基波转速即定子旋转磁场转速的 $2p/Z_2$ 倍。

2.1.2 励磁式低速同步电动机工作原理

与反应式低速同步电动机类似，励磁式低速同步电动机也是利用定、转子开槽引起气隙磁导波变化的原理而工作的电动机。现以轴向充磁永磁低速同步电动机为例来说明该类电动机的工作原理。

轴向充磁永磁低速同步电动机的定子铁心与一般同步电动机一样由硅钢片叠成，定子铁心内圆开有槽，槽内置放两相或三相交流绕组，用以产生旋转磁场。转子中间有一段轴向充磁的永久磁钢，磁钢两端装有用导磁材料制成的磁轭，磁轭表面有开口槽（见图 5.10-7）。两端的两个磁轭在圆周方向互相错开半个转子齿距。定、转子槽数与定子绕组极对数之间满足如下关系

$$Z_2=Z_1\pm p \qquad (5.10\text{-}4)$$

为了与反应式低速同步电动机进行对比，仍以 $Z_1=12$，$Z_2=14$ 的例子来说明永磁低速同步电动机的原理，此时 $p=Z_2-Z_1=2$。图 5.10-3 给出了这种电机两段转子与定子齿、槽分布的情况。

当定子绕组通以三相（或者两相）对称交流电流时，会产生转速为 $n_1=60f/p$ 的空间旋转磁场。图 5.10-3（a）表示转子 S 极性端，在通电瞬间，假设定子旋转磁场的两个 N 极轴线正好与定子齿 1、7 的中心线对齐，而两个 S 极轴线则与定子齿 4、10 的中心线对齐。此时，由于定、转子磁场的作用，转子齿 1、8 试图与定子齿 1、7 对齐，显然此时定子 N 极轴线处，定、转子相互吸引，试图齿、齿正对；而 S 极轴线处，定、转子相互排斥，试图齿、槽正对。图 5.10-3（b）则表示转子 N 极性端，由于两段转子的齿错开了半个齿距，所以从这一端看过去，定子 N 极轴线处，定、转子相互排斥，试图齿、槽正对；而 S 极轴线处，定、转子相互吸引，试图齿、齿正对。不难看出，两段转子磁场与定子磁场的作用力是一致的。图 5.10-3（c）和图 5.10-3（d）绘出的是定子旋转磁场

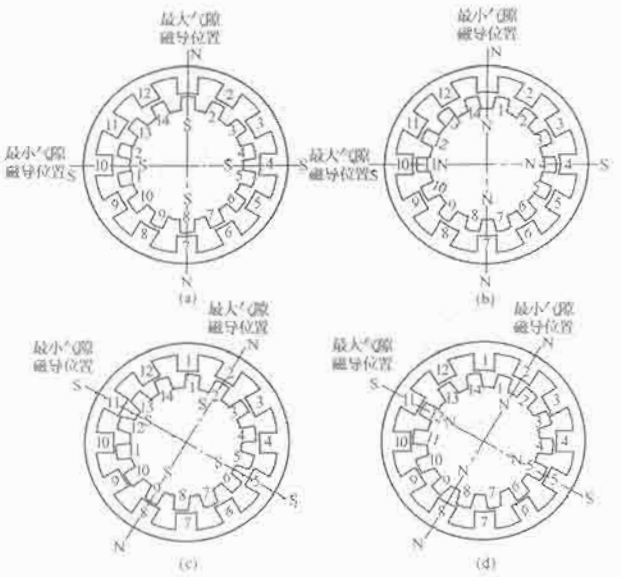


图 5.10-3　轴向充磁永磁低速同步电动机工作原理图
（$Z_1=12$，$Z_2=14$，$p=2$）

转过一个定子齿距角即 $2\pi/Z_1$ 时定、转子齿槽对应的情况。此时定子 N 极轴线处，在转子 S 极性端，由于定、转子相互吸引，转子齿 2、9 试图与定子齿 2、8 的中心线对齐；而在转子 N 极性端，由于定、转子相互排斥，使得定子齿 2、8 试图与转子槽的中心线对齐。不难看出，当定子旋转磁场转过一个定子齿距时，转子转过的电角度为一个定、转子齿角差即 $2\pi(1/Z_1-1/Z_2)$。可见定子旋转磁场与转子转速之间的比值为

$$k_r=\frac{\frac{2\pi}{Z_1}}{2\pi\left(\frac{1}{Z_1}-\frac{1}{Z_2}\right)}=\frac{Z_2}{Z_2-Z_1} \tag{5.10-5}$$

结合式（5.10-4）可知，转子的转速为

$$n=\frac{Z_2-Z_1}{Z_2}n_1=\frac{p}{Z_2}\frac{60f}{p}=\frac{60f}{Z_2} \tag{5.10-6}$$

图 5.10-4 给出了轴向充磁永磁低速同步电动机气隙磁导和气隙磁通密度的分布波形。图 5.10-4(a)中 $\Lambda_{\delta S}(x)$ 是转子 S 极性端的气隙磁导波，$\Lambda_{\delta N}(x)$ 是转子 N 极性端的气隙磁导波，由于两段转子错开半个转子齿距，不难证明，$\Lambda_{\delta N}(x)$ 与 $\Lambda_{\delta S}(x)$ 错开 π 电弧度。由于永久磁钢可以看成恒磁动势源，所以由永久磁钢在气隙中产生的磁通密度波与相应的气隙磁导波具有相同的形状。图 5.10-4(b)中的 $B_{MS}(x)$ 和 $B_{MN}(x)$ 分别表示转子 S 极性端和 N 极性端由永久磁钢产生的气隙磁通密度波，其形状分别与相应的气隙磁导波 $\Lambda_{\delta N}(x)$ 和 $\Lambda_{\delta S}(x)$ 相同。$B_{MS}(x)$ 和 $B_{MN}(x)$ 可以分别看成其平均分量与交变分量之和。平均分量不起有效作用，只使磁路饱和，在设计时应加以考虑。交变分量 $B_{MS1}(x)$ 和 $B_{MN1}(x)$ 具有与普通 $2p$ 极同步电动机励磁磁场相同的分布形式，它是该类电动机的工作磁场。图 5.10-4(b)中 $B_1(x)$ 表示由定子绕组产生的转速为 n_1 的 $2p$ 极定子旋转磁场的空间分布。正是 $B_1(x)$ 与 $B_{MS1}(x)$ 和 $B_{MN1}(x)$ 相互作用产生的同步转矩驱动转子旋转的。不难看出，$B_1(x)$ 和 $B_{MS1}(x)$ 产生的转矩与 $B_1(x)$ 和 $B_{MN1}(x)$ 产生的转矩方向相同，可以相互加强。同样的分析可知，如果两段转子不错开半个齿距而是相互对齐时，则两段产生的电磁转矩方向相反，相互抵消。

从图 5.10-4 还可以看出，轴向充磁永磁低速同步电动机的气隙磁导波在空间变化一个周期，永久磁钢产生的磁通密度基波分量相应表现为一对极。一般情况下，在整个气隙圆周上气隙磁导波变化的周期数为 $|Z_2-Z_1|$，因此永久磁

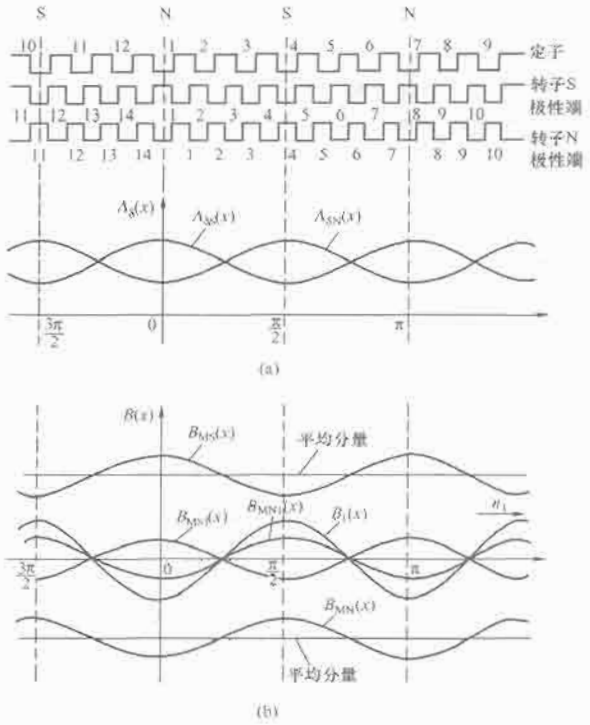


图 5.10-4　轴向充磁永磁低速同步电动机
气隙磁导波与磁通密度波

钢产生的磁通密度波在电动机气隙中的等效极对数为 $p=|Z_2-Z_1|$，即 $Z_2-Z_1=\pm p$。进一步分析可知，取“+”时，转子转向与定子旋转磁场的转向一致，取“−”时转子转向与定子旋转磁场的转向相反。

轴向充磁永磁低速同步电动机的特点是：

1）定、转子槽数必须满足 $Z_2-Z_1=\pm p$，其中 $Z_2>Z_1$ 时，转子旋转方向与定子旋转磁场的方向相同；而 $Z_2<Z_1$ 时，转子旋转方向与定子旋转磁场的方向相反。

2）转子两段磁轭开槽时必须错开半个转子齿距。

3）气隙基波磁导波的分布与一般反应式同步电动机相同。磁导波沿气隙圆周变化的次数为 Z_2-Z_1。

4）气隙基波磁导波的转速与定子旋转磁场的转速相同。

5）转子的转速是气隙磁导波转速即定子旋转磁场转速的 p/Z_2 倍。

2.2　结构

2.2.1　反应式低速同步电动机的结构

图 5.10-5 给出了反应式低速同步电动机的典型结构图。

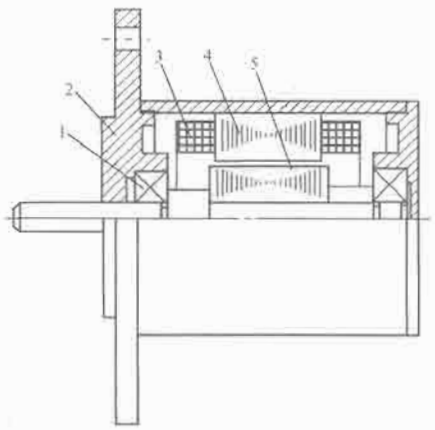


图 5.10-5　反应式低速同步电动机结构
1—轴承；2—端盖；3—定子绕组；4—定子铁心；5—转子铁心

定子铁心由彼此绝缘的硅钢片叠装而成，定子槽中放有两相或三相交流绕组。转子铁心可以由整块钢或者用冲片叠成，铁心外圆均匀分布着齿槽，整个铁心不分段。由于转子上没有绕组，所以转子槽比一般电动机槽浅，整个转子直径可以做得较小，有利于减少转动惯量。

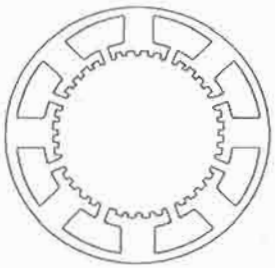


图 5.10-6 典型低速同步电动机定子冲片

低速同步电动机的定子绕组也可以做成多相集中绕组。这种电动机的定子铁心上有成对的磁极（大齿），磁极表面均匀分布着一定数目的小齿。其定子冲片如图 5.10-6 所示。大齿的槽中放置多相集中定子绕组，径向相对的两个磁极线圈串联起来构成一相绕组，其结构与磁阻式步进电动机相似。

2.2.2 励磁式低速同步电动机的结构

轴向充磁永磁低速同步电动机大都做成图 5.10-7 所示的结构。其定子结构与反应式完全一样。图中 1 为轴向充磁的磁钢，2 为转子磁轭，两段磁轭外圆均匀分布着齿槽，并错开半个齿距。这种结构的优点是不需直流电励磁，省去了直流电源和励磁绕组用铜。由于没有励磁绕组铜损耗，电动机效率也可提高。另外，永久磁钢被包在两段转子磁轭中间，空间利用也比较好。永久磁钢早期多采用铝镍钴永磁，现改用钕铁硼永磁。转子轴一般采用非磁性钢做成。在有些情况下也采用磁性轴，这时必须考虑到磁性轴对磁钢工作点及漏磁通的影响。如果在一定直径下要求电动机做得较长，为了增加永久磁钢产生的励磁磁通，提高电动机的出力，转子也可以做成两段磁钢并联工作的结构，如图 5.10-8 所示。这时总的励磁磁通为两段磁钢所产生的磁通之和。

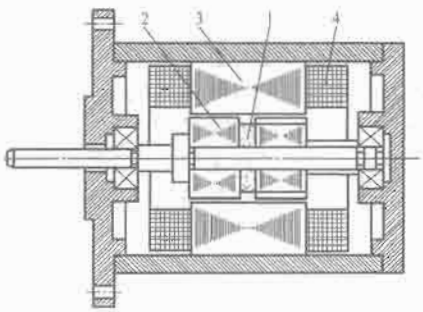


图 5.10-7 轴向充磁永磁低速同步电动机
1—磁钢；2—转子磁轭；3—定子铁心；4—定子绕组

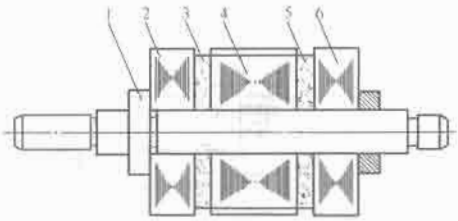


图 5.10-8 轴向充磁永磁式低速同步电动机转子（两段）
1—非磁性轴；2—转子铁心；3—磁钢；
4—转子铁心；5—磁钢；6—转子铁心

图 5.10-9 所示为环形励磁绕组轴向励磁的低速同步电动机。图（a）为单段式结构，其特点是在端盖内侧有一个突缘，上面装有环形的轴向励磁绕组，一般两个端盖上都装有环形励磁绕组，使产生的轴向磁拉力能够相互抵消。和永

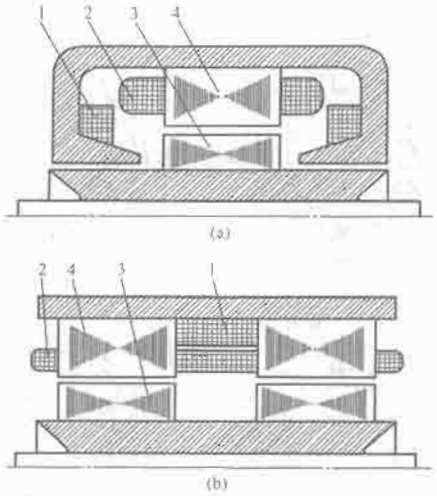


图 5.10-9 环形绕组轴向励磁低速同步电动机
（a）单段式；（b）两段式
1—转子绕组；2—定子绕组；3—转子铁心；4—定子铁心

久磁钢励磁的电动机相比较，这种电动机产生的励磁磁通较大，因此，可以得到较大的转矩。但是，励磁磁通需要经过端盖突缘和转子轴套之间的附加气隙，因此需要较大励磁磁动势，励磁绕组用铜量和铜损耗都比较大，同时轴向长度也要加长，因此适用于容量较大的电动机。当然在这种结构型式中也可以用环形永久磁钢来代替环形励磁绕组。如图 5.10-9（b）所示的结构中，环形励磁绕组装于两段定子铁心之间，转子铁心分成两段，相互之间错移半个转子齿距。

不难看出，永磁式和电励磁式低速同步电动机的区别仅在于获得转子磁场的方式不同，而其磁场分布是相同的。所以这两种电动机统称为轴向励磁低速同步电动机，分析方法也相同。一般来说，电动机功率较小时采用永久磁钢轴向励磁。这无论在制造上和使用上均较方便，而且效率也比较高。当功率较大时，则往往采用电励磁式，以克服磁钢制造上的困难。

3 基本理论分析

从上节的介绍可知，低速同步电动机是利用定、转子表面开槽引起气隙磁导波变化的原理工作的。本节将要介绍的低速同步电动机气隙磁导波和磁通密度波的组成、分布和变化情况，是进一步研究低速同步电动机工作原理和进行设计计算的基础。

3.1 气隙比磁导波

气隙圆周上任意点 x 处的气隙比磁导 $\lambda_\delta(x)$ 定义为该点气隙磁通密度 $B_\delta(x)$ 与气隙磁动势 $F(x)$ 的比值

$$\lambda_\delta(x)=\frac{B_\delta(x)}{F(x)} \tag{5.10-7}$$

当定、转子都没有齿槽，气隙均匀时，气隙圆周上各点的气隙比磁导的大小都是相等的

$$\lambda_\delta(x)=\lambda_{\delta 0}=\frac{B_{\delta 0}}{F}=\frac{\mu_0}{\delta} \tag{5.10-8}$$

假设定子侧有 Z_1 个开口槽而转子边光滑无槽，当定子边有一个整距线圈通过电流时，在某一固定时刻，它产生的磁动势在空间可以看做常数。由于定子齿槽的影响，在线圈一个节距内气隙磁感应强度 $B_x(x)$ 呈波浪式分布。它由平均分量 B_{x0} 和一系列空间谐波合成。对应的气隙比磁导空间分

布波形 $\lambda_s(x)$ 与 $B_s(x)$ 相同，如图 5.10-10 所示。以定子第 1 个齿中心线为坐标原点，则比磁导波 $\lambda_s(x)$ 可以表示为

$$\lambda_s(x)=\lambda_{s0}+\sum_1^k \lambda_{sk}\cos kZ_1 x$$

$$=\lambda_{\delta 0}\left(\frac{1}{k_{\delta 1}}+\frac{1}{\lambda_{\delta 0}}\sum_1^k \lambda_{sk}\cos kZ_1 x\right) \quad (5.10\text{-}9)$$

式中，λ_{s0} 为当定子有槽、转子光滑时气隙比磁导的平均分量，其数值等于等效均匀气隙 $\delta'=k_{\delta 1}\delta$ 对应的气隙比磁导，$\lambda_{s0}=\dfrac{\mu_0}{k_{\delta 1}\delta}=\dfrac{\lambda_{\delta 0}}{k_{\delta 1}}$，其中 $k_{\delta 1}$ 为考虑定子齿槽影响的气隙系数；λ_{sk} 为气隙比磁导第 k 次谐波的幅值。

以式 (5.10-8) 所示的均匀气隙 δ 时的气隙比磁导 $\lambda_{\delta 0}$ 为基值，则定子开槽、转子光滑的不均匀气隙比磁导可以用标么值表示

$$\lambda_s^*(x)=\frac{\lambda_s(x)}{\lambda_{\delta 0}}=\lambda_{s0}^*+\sum_1^k \lambda_{sk}^*\cos kZ_1 x \quad (5.10\text{-}10)$$

式中，$\lambda_{s0}^*=1/k_{\delta 1}$ 为 λ_{s0} 的标么值，$\lambda_{sk}^*=\lambda_{sk}/\lambda_{\delta 0}$ 为 λ_{sk} 的标么值。

磁场分析表明，气隙比磁导标么值的平均分量和各次谐波分量均与齿层几何尺寸有关。图 5.10-11 和图 5.10-12 分别给出了单边开槽气隙比磁导标么值平均分量 λ_{s0}^* 和基波分量 λ_{s1}^* 与齿层几何尺寸的关系曲线。图中 b_s 为槽宽，t 为齿距，δ 为气隙长度。

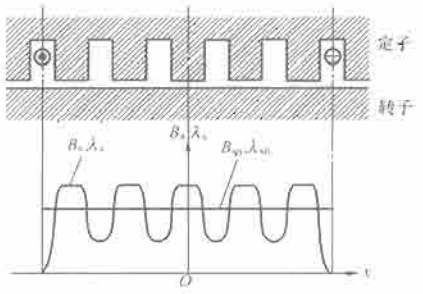


图 5.10-10　定子边有槽时的气隙比磁导波

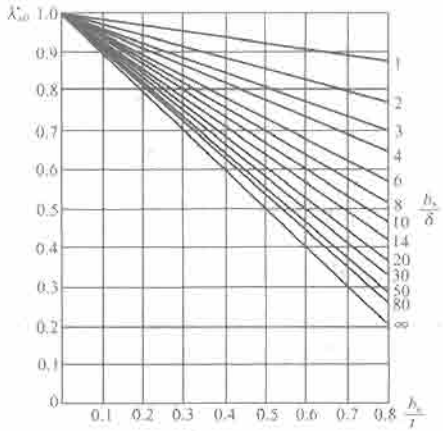


图 5.10-11　单边开槽气隙比磁导标么值的平均分量

当定子光滑无槽，转子上有 Z_2 个开口槽，转子以机械角速度 ω 旋转时，气隙磁导波将随转子一起旋转，可以表示为

$$\lambda_r(x,t)=\lambda_{r0}+\sum_1^n \lambda_{rn}\cos nZ_2(x-\omega t)$$

$$=\lambda_{\delta 0}\left(\frac{1}{k_{\delta 2}}+\frac{1}{\lambda_{\delta 0}}\right)\sum_1^n \lambda_{rn}\cos nZ_2(x-\omega t) \quad (5.10\text{-}11)$$

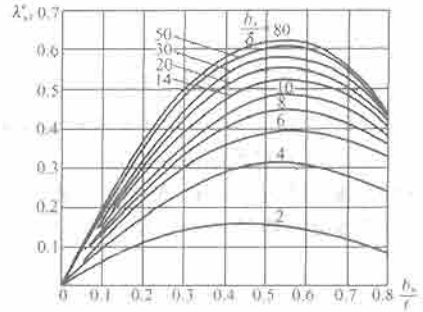


图 5.10-12　单边开槽气隙比磁导标么值基波分量的幅值

式中，λ_{r0} 为当定子光滑、转子边有槽时气隙比磁导的平均分量，其数值等于等效均匀气隙 $\delta''=k_{\delta 2}\delta$ 对应的气隙比磁导，$\lambda_{r0}=\dfrac{\mu_0}{k_{\delta 2}\delta}=\dfrac{\lambda_{\delta 0}}{k_{\delta 2}}$，其中 $k_{\delta 2}$ 为考虑转子齿槽影响的气隙系数；λ_{rn} 为气隙比磁导第 n 次谐波的幅值。

正确地设计定、转子齿槽层的几何尺寸，可以在很大程度上减小气隙磁导中的高次谐波分量，因此在作一般讨论时可以将高次谐波忽略。当只考虑基波时，式 (5.10-9) 和式 (5.10-11) 表示为

$$\lambda_s(x)=\lambda_{s0}+\lambda_{s1}\cos Z_1 x=\lambda_{\delta 0}\left(\frac{1}{k_{\delta 1}}+\frac{\lambda_{s1}}{\lambda_{\delta 0}}\cos Z_1 x\right) \quad (5.10\text{-}12)$$

$$\lambda_r(x,t)=\lambda_{r0}+\lambda_{r1}\cos Z_2(x-\omega t)$$

$$=\lambda_{\delta 0}\left[\frac{1}{k_{\delta 2}}+\frac{\lambda_{r1}}{\lambda_{\delta 0}}\cos Z_2(x-\omega t)\right] \quad (5.10\text{-}13)$$

当定、转子都有槽时，气隙比磁导可以表示为

$$\lambda_\delta(x,t)=\lambda_{\delta 0}\left(\frac{1}{k_{\delta 1}}+\frac{\lambda_{s1}}{\lambda_{\delta 0}}\cos Z_1 x\right)\left[\frac{1}{k_{\delta 2}}+\frac{\lambda_{r1}}{\lambda_{\delta 0}}\cos Z_2(x-\omega t)\right]$$

$$=\frac{\lambda_{\delta 0}}{k_{\delta 1}k_{\delta 2}}+\frac{\lambda_{s1}}{k_{\delta 2}}\cos Z_1 x+\frac{\lambda_{r1}}{k_{\delta 1}}\cos Z_2(x-\omega t)+$$

$$\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\cos[(Z_2-Z_1)x-Z_2\omega t]+$$

$$\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\cos[(Z_2+Z_1)x-Z_2\omega t] \quad (5.10\text{-}14)$$

由上式可知，定、转子均有槽时，气隙比磁导波包括 5 个分量。第 1 项为平均分量，第 2 项为定子齿槽引起的定子齿比磁导波，它是在气隙圆周上交变 Z_1 次的静止比磁导波；第 3 项为转子齿槽引起的转子齿比磁导波，它是在气隙圆周上交变 Z_2 次的旋转比磁导波，其角速度为 ω，转向与转子转向相同；第 4、5 项为由定、转子齿槽共同作用产生的气隙比磁导波，是次数为 $Z_2\mp Z_1$ 的旋转磁导波，角速度为 $Z_2\omega/(Z_2\mp Z_1)$。

其中第 4 项气隙比磁导波的次数为 Z_2-Z_1，即定、转子齿数差。低速同步电动机通常设计成定、转子齿数相差不大，所以该波在气隙比磁导波中次数最低，其幅值 λ_1 为 $\lambda_{s1}\lambda_{r1}/2\lambda_{\delta 0}$，角速度为 $Z_2\omega/(Z_2-Z_1)$，是转子角速度的 $k_z=Z_2/(Z_2-Z_1)$ 倍。低速同步电动机正是利用了这一气隙比磁导波作为工作比磁导波，所以称之为基波比磁导波。

3.2　气隙磁场

3.2.1　反应式低速同步电动机的气隙磁场

反应低速同步电动机的气隙磁场由定子绕组单独产生，定子绕组通过交流电流时产生的旋转磁动势是基波和一系列

空间谐波的合成

$$F(x,t)=\sum_{\nu=1}^{\infty}F_{m\nu}\cos(\nu p x-\omega_1 t) \tag{5.10-15}$$

式中，$F_{m\nu}$为ν（$\nu=1,2,3,\cdots$）次谐波磁动势幅值；p为定子绕组极对数；ω_1为定子电流的角频率。

气隙中的磁通密度为定子磁动势与气隙比磁导的乘积，当只考虑定子基波磁动势时，气隙磁通密度为

$$\begin{aligned}B_\delta(x,t)=&F_{m1}\cos(px-\omega_1 t)\left\{\frac{\lambda_{\delta 0}}{k_{\delta 1}k_{\delta 2}}+\frac{\lambda_{s1}}{k_{\delta 2}}\cos Z_1 x+\right.\\&\frac{\lambda_{r1}}{k_{\delta 1}}\cos Z_2(x-\omega t)+\\&\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\cos[(Z_2-Z_1)x-Z_2\omega t]+\\&\left.\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\cos[(Z_2+Z_1)x-Z_2\omega t]\right\}\\=&B_{\delta 1}+B_{\delta 2}+B_{\delta 3}+B_{\delta 4}+B_{\delta 5}\end{aligned} \tag{5.10-16}$$

式中，$B_{\delta 1}=F_{m1}\frac{\lambda_{\delta 0}}{k_{\delta 1}k_{\delta 2}}\cos(px-\omega_1 t)$；

$$\begin{aligned}B_{\delta 2}=&F_{m1}\frac{\lambda_{s1}}{k_{\delta 2}}\cos(px-\omega_1 t)\cos Z_1 x\\=&F_{m1}\frac{\lambda_{s1}}{2k_{\delta 2}}\{\cos[(Z_1-p)x+\omega_1 t]+\\&\cos[(Z_1+p)x-\omega_1 t]\};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B_{\delta 3}=&F_{m1}\frac{\lambda_{r1}}{k_{\delta 1}}\cos(px-\omega_1 t)\cos Z_2(x-\omega t)\\=&F_{m1}\frac{\lambda_{r1}}{2k_{\delta 1}}\{\cos[(Z_2-p)x-(Z_2\omega-\omega_1)t]+\\&\cos[(Z_2+p)x-(Z_2\omega+\omega_1)t]\};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B_{\delta 4}=&F_{m1}\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\cos(px-\omega_1 t)\cos[(Z_2-Z_1)x-Z_2\omega t]\\=&F_{m1}\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\{\cos[(Z_2-Z_1-p)x-(Z_2\omega-\omega_1)t]+\\&\cos[(Z_2-Z_1+p)x-(Z_2\omega+\omega_1)t]\};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B_{\delta 5}=&F_{m1}\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\cos(px-\omega_1 t)\cos[(Z_2+Z_1)x-Z_2\omega t]\\=&F_{m1}\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\{\cos[(Z_2+Z_1-p)x-(Z_2\omega-\omega_1)t]+\\&\cos[(Z_2+Z_1+p)x-(Z_2\omega+\omega_1)t]\}\end{aligned}$$

式中，$B_{\delta 1}$为基波旋转磁场。

$B_{\delta 2}$为定子齿谐波旋转磁场，包括：一项是(Z_2-p)次，其角速度为$\frac{-\omega_1}{Z_2-p}$；另一项为(Z_2+p)次，角速度为$\frac{\omega_1}{Z_2+p}$，二者转向相反；

$B_{\delta 3}$为转子齿谐波旋转磁场，包括：一项是(Z_2-p)次，其角速度为$\frac{Z_2\omega-\omega_1}{Z_2-p}$；另一项为$(Z_2+p)$次，角速度为$\frac{Z_2\omega+\omega_1}{Z_2+p}$，二者转向相同。

$B_{\delta 4}$是由定、转子齿数差引起的齿谐波旋转磁场。包括：一项为(Z_2-Z_1-p)次，角速度为$\frac{Z_2\omega-\omega_1}{Z_2-Z_1-p}$；另一项为$(Z_2-Z_1+p)$次，角速度为$\frac{Z_2\omega+\omega_1}{Z_2-Z_1+p}$，转向相同。

$B_{\delta 5}$是由定、转子齿数和引起的齿谐波旋转磁场。包括：一项为(Z_2+Z_1-p)次，角速度为$\frac{Z_2\omega-\omega_1}{Z_2+Z_1-p}$；另一项为$(Z_2+Z_1+p)$次，角速度为$\frac{Z_2\omega+\omega_1}{Z_2+Z_1+p}$，转向相同。

很显然，某些分量的转速不仅与ω_1有关，而且与转子的转速ω有关。从电机原理可知，某两个空间磁场在次数相等，彼此又相对静止（即同步）时，就能产生平均转矩。在这里，希望使(Z_2-Z_1-p)次转子磁场与定子基波磁场相互作用，产生同步转矩。因此

$$\left.\begin{aligned}p&=Z_2-Z_1-p\\\frac{\omega_1}{p}&=\frac{Z_2\omega-\omega_1}{Z_2-Z_1-p}\end{aligned}\right\} \tag{5.10-17}$$

所以

$$Z_2-Z_1=2p \tag{5.10-18}$$

$$\omega=\frac{2\omega_1}{Z_2} \tag{5.10-19}$$

$$n=\frac{120f}{Z_2} \tag{5.10-20}$$

式（5.10-17）中的p次磁场是定子基波磁动势作用在气隙平均磁导波上产生的；(Z_2-Z_1-p)次磁场是定子基波磁动势作用在气隙(Z_2-Z_1)次基波磁导波上产生的。在气隙中它们是起主要作用的磁场、因此，这里只考虑这一对磁场。其他磁场相对来说比较弱，故予以忽略。

3.2.2 轴向励磁低速同步电动机的气隙磁场

励磁式低速同步电动机除了定子基波旋转磁动势产生的磁场外，转子轴向励磁磁动势在气隙圆周上还将形成一个幅值恒定的磁动势F_M，由F_M作用在气隙比磁导波上，形成另一气隙磁场

$$\begin{aligned}B_M(x,t)=&F_M\lambda_\delta(x,t)\\=&F_M\left\{\frac{\lambda_{\delta 0}}{k_{\delta 1}k_{\delta 2}}+\frac{\lambda_{s1}}{k_{\delta 2}}\cos Z_1 x+\frac{\lambda_{r1}}{k_{\delta 1}}\cos Z_2(x-\omega t)+\right.\\&\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\cos[(Z_2-Z_1)x-Z_2\omega t]+\\&\left.\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\cos[(Z_2+Z_1)x-Z_2\omega t]\right\}\\=&B_{M0}+B_{M1}+B_{M2}+B_{M3}+B_{M4}\end{aligned} \tag{5.10-21}$$

式中，$B_{M0}=F_M\frac{\lambda_{\delta 0}}{k_{\delta 1}k_{\delta 2}}$，是由$F_M$产生的气隙磁场的恒定分量；$B_{M1}=F_M\frac{\lambda_{s1}}{k_{\delta 2}}\cos Z_1 x$，是在气隙圆周上正弦分布的固定不动的$Z_1$次磁通密度波；$B_{M2}=F_M\frac{\lambda_{r1}}{k_{\delta 1}}\cos Z_2(x-\omega t)$，是与转子角速度相同的$Z_2$次旋转磁通密度波；$B_{M3}=F_M\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\cos[(Z_2-Z_1)x-Z_2\omega t]$，是角速度为$\frac{Z_2\omega}{Z_2-Z_1}$的旋转磁通密度波；$B_{M4}=F_M\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\cos[(Z_2+Z_1)x-Z_2\omega t]$，是角速度为$\frac{Z_2\omega}{Z_2+Z_1}$的旋转磁通密度波。

低速同步的条件是：当转子磁动势产生的旋转磁场与定子磁动势产生的旋转磁场的次数相同且相对静止时，彼此作用就能产生同步转矩。分析定子旋转磁动势产生的磁通密度波和转子磁动势产生的磁通密度波的各个磁场分量可知：当只考虑定子基波旋转磁场$B_{\delta 1}$时，则它只有与B_{M3}相互作用时，才能满足上述条件，所以

$$\left.\begin{aligned}p&=Z_2-Z_1\\\frac{\omega_1}{p}&=\frac{Z_2\omega}{Z_2-Z_1}\end{aligned}\right\} \tag{5.10-22}$$

由此可得到下列关系式

$$\omega=\frac{\omega_1}{Z_2} \tag{5.10-23}$$

$$n=\frac{60f}{Z_2} \tag{5.10-24}$$

轴向励磁式低速同步电动机中，主要利用$(Z_2-Z_1)=p$次的低次比磁导波。当转子磁动势F_M作用在(Z_2-Z_1)次旋转比磁导波上时，就产生了p次旋转磁场，其角速度等于定子p次旋转磁场的角速度。同次的定、转子磁场彼此相互作用，就产生了同步转矩。

3.3　基本参数、方程式及电磁转矩

3.3.1　反应式低速同步电动机的基本参数、方程式和电磁转矩

(1) 基本参数

在低速同步电动机运行过程中，与定子磁动势波同步的不是转子本身，而是气隙比磁导波的基波分量。气隙比磁导基波具有与普通$2p$极凸极同步电动机的气隙比磁导波类似的特征。因此可以采用分析普通凸极同步电动机的双反应理论来分析低速同步电动机。一般采用与气隙比磁导基波同步旋转的d-q坐标系统来分析，d轴位于比磁导最大处，q轴位于比磁导最小处，并将坐标原点放在d轴上，如图5.10-13所示。如果用y表示d-q坐标系统中气隙圆周坐标，当只考虑气隙比磁导波的平均分量和基波分量时，在d-q坐标系统中气隙比磁导公式可以写成

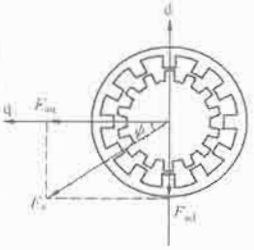


图 5.10-13　低速同步电动机的d-q坐标系统

$$\begin{aligned}\lambda_\delta(y)&=\frac{\lambda_{\delta 0}}{k_{\delta 1}k_{\delta 2}}+\frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}\cos 2py\\&=\lambda_0+\lambda_1\cos 2py\end{aligned}\tag{5.10-25}$$

式中，$\lambda_0=\dfrac{\lambda_{\delta 0}}{k_{\delta 1}k_{\delta 2}}$；$\lambda_1=\dfrac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta 0}}$。

定子磁动势基波可以表示为

$$\begin{aligned}F_a(y)&=F_{m1}\cos(py-90^\circ-\psi)\\&=F_{ad}\cos py+F_{aq}\sin py\end{aligned}\tag{5.10-26}$$

式中，$\begin{cases}F_{ad}=F_{m1}\cos(\psi+90^\circ)=-F_{m1}\sin\psi\\F_{aq}=F_{m1}\sin(\psi+90^\circ)=F_{m1}\cos\psi\end{cases}$为定子磁动势在d轴和q轴的分量的幅值；$\psi$为定子磁动势轴线与q轴的空间电夹角，相当于普通凸极同步电动机的内功率因数角。

气隙磁通密度可以确定为

$$\begin{aligned}B_\delta(y)&=F_a(y)\lambda_\delta(y)\\&=(F_{ad}\cos py+F_{aq}\sin py)(\lambda_0+\lambda_1\cos 2py)\\&=F_{ad}\left(\lambda_0+\frac{\lambda_1}{2}\right)\cos py+F_{aq}\left(\lambda_0-\frac{\lambda_1}{2}\right)\sin py+\\&\quad\frac{1}{2}F_{ad}\lambda_1\cos 3py+\frac{1}{2}F_{aq}\lambda_1\sin 3py\end{aligned}\tag{5.10-27}$$

从上式可见，d、q轴磁通密度的基波幅值分别为

$$\left.\begin{aligned}B_{ad}&=F_{ad}\left(\lambda_0+\frac{1}{2}\lambda_1\right)\\B_{aq}&=F_{aq}\left(\lambda_0-\frac{1}{2}\lambda_1\right)\end{aligned}\right\}\tag{5.10-28}$$

d、q轴的电枢反应磁通的基波分别为

$$\left.\begin{aligned}\Phi_{ad}&=\frac{2}{\pi}\tau lB_{ad}=\frac{2}{\pi}\tau lF_{ad}\left(\lambda_0+\frac{\lambda_1}{2}\right)\\\Phi_{aq}&=\frac{2}{\pi}\tau lB_{aq}=\frac{2}{\pi}\tau lF_{aq}\left(\lambda_0-\frac{\lambda_1}{2}\right)\end{aligned}\right\}\tag{5.10-29}$$

式中，τ为定子绕组的极距；l为定子铁心有效长度。

在定子绕组中感应的电枢反应电动势分别为

$$\left.\begin{aligned}E_{ad}&=\frac{1}{\sqrt{2}}2\pi fN_1k_{w1}\Phi_{ad}\\E_{aq}&=\frac{1}{\sqrt{2}}2\pi fN_1k_{w1}\Phi_{aq}\end{aligned}\right\}\tag{5.10-30}$$

式中，N_1为定子绕组每相串联匝数；k_{w1}为定子绕组系数。

基波磁动势的幅值为

$$F_{m1}=\frac{\sqrt{2}}{\pi}m_1\frac{N_1k_{w1}}{p}I_1\tag{5.10-31}$$

式中，m_1为定子绕组相数；I_1为定子相电流有效值。因此d、q轴磁动势幅值分别为

$$\left.\begin{aligned}F_{ad}&=F_{m1}\cos\psi=\frac{\sqrt{2}}{\pi}m_1\frac{N_1k_{w1}}{p}I_1\cos\psi=\frac{\sqrt{2}}{\pi}m_1\frac{N_1k_{w1}}{p}I_d\\F_{aq}&=F_{m1}\sin\psi=\frac{\sqrt{2}}{\pi}m_1\frac{N_1k_{w1}}{p}I_1\sin\psi=\frac{\sqrt{2}}{\pi}m_1\frac{N_1k_{w1}}{p}I_q\end{aligned}\right\}\tag{5.10-32}$$

所以

$$\left.\begin{aligned}E_{ad}&=2m_1f\frac{\mu_0Dl}{k_\delta\delta}\left(\frac{N_1k_{w1}}{p}\right)^2\left(1+\frac{1}{2}\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)I_d=x_{ad}I_d\\E_{aq}&=2m_1f\frac{\mu_0Dl}{k_\delta\delta}\left(\frac{N_1k_{w1}}{p}\right)^2\left(1-\frac{1}{2}\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)I_q=x_{aq}I_q\end{aligned}\right\}\tag{5.10-33}$$

式中，D为定子铁心内径；μ_0为空气磁导率；x_{ad}、x_{aq}定义为d轴和q轴电枢反应电抗，其值为

$$\left.\begin{aligned}x_{ad}&=\frac{E_{ad}}{I_d}=2m_1f\frac{\mu_0Dl}{k_\delta\delta}\left(\frac{N_1k_{w1}}{p}\right)^2\left(1+\frac{1}{2}\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)=x_ak_{ad}\\x_{aq}&=\frac{E_{aq}}{I_q}=2m_1f\frac{\mu_0Dl}{k_\delta\delta}\left(\frac{N_1k_{w1}}{p}\right)^2\left(1-\frac{1}{2}\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)=x_ak_{aq}\end{aligned}\right\}\tag{5.10-34}$$

式中，x_a为与气隙平均比磁导λ_0相对应的电枢反应电抗，即气隙为等效均匀气隙$k_\delta\delta$的电枢反应电抗。

$$x_a=2m_1f\frac{\mu_0Dl}{k_\delta\delta}\left(\frac{N_1k_{w1}}{p}\right)^2\tag{5.10-35}$$

k_{ad}、k_{aq}分别为d轴和q轴的电枢反应系数。

$$k_{ad}=1+\frac{1}{2}\frac{\lambda_1}{\lambda_0},\ k_{aq}=1-\frac{1}{2}\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\tag{5.10-36}$$

对低速同步电动机来说，定子绕组的漏抗电压降和电阻电压降对电机特性有较大的影响，在分析时必须加以考虑。考虑到定子绕组漏电抗x_1后，低速同步电动机的主要参数同步电抗可以表示为

$$\left.\begin{aligned}x_d&=x_{ad}+x_1\\x_q&=x_{aq}+x_1\end{aligned}\right\}\tag{5.10-37}$$

(2) 电动势方程式

与普通反应式同步电动机类似，每相电压平衡方程式可以写成

$$\begin{aligned}\dot U_1&=\mathrm{j}\dot I_dx_{ad}+\mathrm{j}\dot I_qx_{aq}+\mathrm{j}\dot I_1x_1+\dot I_1r_1\\&=\mathrm{j}\dot I_d(x_{ad}+x_1)+\mathrm{j}\dot I_q(x_{aq}+x_1)+\dot I_1r_1\\&=\mathrm{j}\dot I_dx_d+\mathrm{j}\dot I_qx_q+\dot I_1r_1\end{aligned}\tag{5.10-38}$$

根据电压平衡方程式可以画出相量图，如图5.10-14所示。

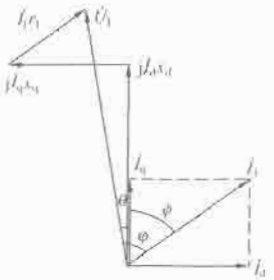


图 5.10-14 反应式低速同步电动机相量图

(3) 电磁转矩

由相量图可知，反应式低速同步电动机的输入功率为

$$\begin{aligned}P_1 &= m_1U_1I_1\cos\varphi = m_1U_1I_1\cos(\psi-\theta)\\ &= m_1U_1I_1\cos\psi\cos\theta - m_1U_1I_1\sin\psi\sin\theta\\ &= m_1U_1I_q\cos\theta - m_1U_1I_d\sin\theta\end{aligned} \tag{5.10-39}$$

式中，$\theta=\varphi-\psi$，对应于普通凸极同步电动机的功角。

从相量图可以看出

$$\begin{cases}U_1\cos\theta = I_dx_d + I_qr_1\\ U_1\sin\theta = I_qx_q - I_dr_1\end{cases}$$

解上式可得

$$\left.\begin{aligned}I_d &= U_1\frac{x_q\cos\theta - r_1\sin\theta}{x_dx_q + r_1^2}\\ I_q &= U_1\frac{x_d\sin\theta + r_1\cos\theta}{x_dx_q + r_1^2}\end{aligned}\right\}$$

输入相电流为

$$I_1 = \sqrt{I_d^2+I_q^2} = \frac{U_1}{x_dx_q+r_1^2}\times \sqrt{x_d^2\sin^2\theta + x_q^2\cos^2\theta + r_1(x_d-x_q)\sin2\theta + r_1^2} \tag{5.10-40}$$

由此可以得到定子的输入功率为

$$P_1 = \frac{m_1}{2}U_1^2\frac{(x_d-x_q)\sin2\theta + 2r_1}{x_dx_q+r_1^2} \tag{5.10-41}$$

忽略定子铁损耗时，电磁功率为

$$P_M = P_1 - m_1I_1^2r_1 = \frac{m_1U_1^2}{2}\frac{x_d-x_q}{(x_dx_q+r_1^2)^2}\times \left[(x_dx_q-r_1^2)\sin2\theta + r_1(x_d+x_q)\cos2\theta - r_1(x_d-x_q)\right] \tag{5.10-42}$$

同步转矩为

$$\begin{aligned}T = \frac{P_M}{\omega} &= \frac{m_1U_1^2}{2\omega}\frac{x_d-x_q}{(x_dx_q+r_1^2)^2}\times\\ &\left[(x_dx_q-r_1^2)\sin2\theta + r_1(x_d+x_q)\cos2\theta - r(x_d-x_q)\right]\\ &= T_{dq1}\sin(2\theta+\alpha_1) - T_{dq2}\end{aligned} \tag{5.10-43}$$

式中

$$T_{dq1} = \frac{m_1U_1^2}{2\omega}\frac{x_d-x_q}{(x_dx_q+r_1^2)^2}\sqrt{(x_dx_q-r_1^2)^2+(r_1x_d+r_1x_q)^2}$$

$$\alpha_1 = \arctan\frac{r_1(x_d+x_q)}{x_dx_q-r_1^2}$$

$$T_{dq2} = \frac{m_1U_1^2}{2\omega}\frac{r_1(x_d-x_q)^2}{(x_dx_q+r_1^2)^2}$$

$$\omega = \frac{2\pi f}{p}/k_r = \frac{4\pi f}{Z_2}$$

电磁转矩可以看成两部分组成，第一部分和 θ 有关，第二部分是制动转矩，它的大小和 θ 无关，和定子电阻 r_1 成正比。反应式低速同步电动机只有当 $x_d\neq x_q$ 时才能产生同步电磁转矩。

令 $\frac{dP_M}{d\theta}=0$，解得 $\theta=\theta_m=\frac{1}{2}\arctan\frac{x_dx_q-r_1^2}{r_1(x_d+x_q)}$，代入后可得最大电磁功率

$$P_{Mmax} = \frac{m_1}{2}U_1^2\frac{x_d-x_q}{(x_dx_q+r_1^2)^2}\times \left[\sqrt{(x_d^2+r_1^2)(x_q^2+r_1^2)} - r_1(x_d-x_q)\right] \tag{5.10-44}$$

最大电磁转矩为

$$T_{max} = \frac{m_1}{2\omega}U_1^2\frac{x_d-x_q}{(x_dx_q+r_1^2)^2}\times \left[\sqrt{(x_d^2+r_1^2)(x_q^2+r_1^2)} - r_1(x_d-x_q)\right] \tag{5.10-45}$$

如果忽略 r_1，则 $\theta_m=45°$。

从转矩特性表达式可以看出，定子电阻对反应式低速电动机性能影响很大。当定子电阻增大时，最大电磁转矩减小，出现最大转矩时的 θ_m 角也减小，电磁转矩曲线向左移动，如图 5.10-15 所示。另外，x_d-x_q 越大，最大电磁转矩也越大。

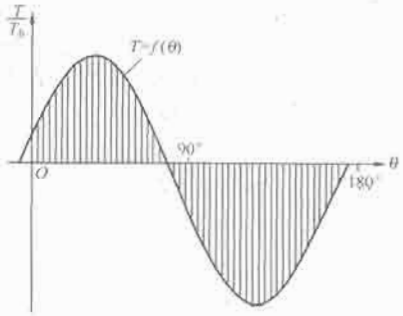


图 5.10-15 反应式低速同步电动机的转矩特性

3.3.2 永磁式低速同步电动机的基本参数、方程式及电磁转矩

(1) 基本参数

轴向励磁低速同步电动机也是利用气隙基波磁导工作的。在 dq 坐标系统中，其气隙磁导波以及定子磁动势表达式与反应式低速同步电动机相同。但在确定定子磁动势产生的气隙磁通密度时，必须考虑电枢反应单极磁动势的作用。根据参考文献 [1]，电枢反应单极磁动势为

$$\Delta F = \frac{\int_0^{2\pi}(F_{ad}\cos py + F_{aq}\sin py)(\Lambda_0+\Lambda_1\cos py)dy}{\int_0^{2\pi}(\Lambda_0+\Lambda_1\cos py)dy} = \frac{1}{2}F_{ad}\frac{\Lambda_1}{\Lambda_0} \tag{5.10-46}$$

式中，Λ_0 为气隙磁导平均分量；Λ_1 为气隙基波磁导幅值。

定子磁动势产生的磁通密度为

$$\begin{aligned}B_\delta(y) &= [F_a(y)-\Delta F]\Lambda_\delta(y)\\ &= \left(F_{ad}\cos py + F_{aq}\sin py - \frac{1}{2}F_{ad}\frac{\Lambda_1}{\Lambda_2}\right)(\Lambda_0+\Lambda_1\cos py)\\ &= F_{ad}\left(\Lambda_0 - \frac{1}{2}\frac{\Lambda_1}{\Lambda_2}\right)\cos py + \frac{1}{2}F_{ad}\Lambda_1\cos2py +\\ &\quad \frac{1}{2}F_{aq}\Lambda_0\sin py + \frac{1}{2}F_{aq}\Lambda_1\sin2py\end{aligned} \tag{5.10-47}$$

从上式可见，d 和 q 轴电枢反应基波磁通密度的幅值分别为

$$\left.\begin{aligned} B_{ad} &= F_{ad}\left(\Lambda_0-\frac{1}{2}\frac{\Lambda_1^2}{\Lambda_0}\right)=F_{ad}\Lambda_0\left(1-\frac{1}{2}k_p^2\right)\\ B_{aq} &= F_{aq}\Lambda_0 \end{aligned}\right\} \tag{5.10-48}$$

B_{ad} 是由 F_{ad} 作用在气隙磁导平均分量 Λ_0 上以及 ΔF 作用在气隙基波磁导 Λ_1 上产生的。B_{aq} 是由 q 轴电枢反应磁动势 F_{aq} 作用在气隙平均磁导 Λ_0 上产生的。应当注意，由于 ΔF 的作用，使得 B_{ad} 减小了。

如果同样用 x_a 来表示与气隙平均磁导 Λ_0 对应的电枢反应电抗，那么对励磁式低速同步电动机来说，d、q 轴电枢反应电抗分别为

$$\left.\begin{aligned} x_{ad} &= \left(1-\frac{1}{2}\frac{\Lambda_1^2}{\Lambda_0^2}\right)x_a=\left(1-\frac{1}{2}k_p^2\right)x_a=k_{ad}x_a\\ x_{aq} &= x_a=k_{aq}x_a \end{aligned}\right\} \tag{5.10-49}$$

式中，$k_{ad}=1-\frac{1}{2}k_p^2 k_{aq}=1$。

在轴向励磁式电动机中，由于 $k_{ad}<k_{aq}$，所以 $x_{ad}<x_{aq}$。这和一般凸极电动机的情况正好相反，其原因是由于电枢反应单极磁动势 ΔF 的作用使 d 轴电枢反应磁通减小引起的。

考虑到定子绕组漏电抗 x_1 后，低速同步电动机的主要参数同步电抗可以表示为

$$\left.\begin{aligned} x_d &= x_{ad}+x_1\\ x_q &= x_{aq}+x_1 \end{aligned}\right\} \tag{5.10-50}$$

(2) 电动势方程式

和一般同步电动机一样，励磁式低速同步电动机每相电压平衡方程式可以写成

$$\dot{U}_1=\dot{E}_0+\mathrm{j}\dot{I}_d x_d+\mathrm{j}\dot{I}_q x_q+\dot{I}_1 r_1 \tag{5.10-51}$$

式中，$\dot{E}_0$ 为轴向励磁磁动势产生的基波磁通在定子每相绕组中产生的感应电动势。

$$E_0=4.44N_1 f k_{w1}\Phi_{M1} \tag{5.10-52}$$

式中，Φ_{M1} 为轴向励磁磁动势产生的每极基波磁通。

根据电压平衡方程可以画出相量图，如图 5.10-16 所示。

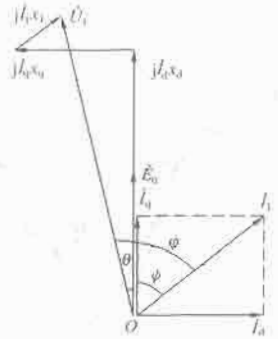


图 5.10-16　励磁式低速同步电动机相量图

(3) 电磁转矩

由电压相量图可知为

$$\left.\begin{aligned} E_0+I_q r_1+I_d x_d &= U_1\cos\theta\\ I_q x_q-I_d r_1 &= U_1\sin\theta \end{aligned}\right\} \tag{5.10-53}$$

解上式得

$$\left.\begin{aligned} I_d &= \frac{x_q(U_1\cos\theta-E_0)-r_1U_1\sin\theta}{r_1^2+x_dx_q}\\ I_q &= \frac{r_1(U_1\cos\theta-E_0)+x_dU_1\sin\theta}{r_1^2+x_dx_q} \end{aligned}\right\}$$

所以定子每相电流

$$I_1=\sqrt{I_d^2+I_q^2}=\frac{1}{r_1^2+x_dx_q}\times\sqrt{[x_q(U_1\cos\theta-E_0)-r_1U_1\sin\theta]^2+[r_1(U_1\cos\theta-E_0)+x_dU_1\sin\theta]^2} \tag{5.10-54}$$

定子输入功率为

$$\begin{aligned} P_M &= P_1-mI_1^2r_1\\ &= mU_1I_1\cos\varphi-mI_1^2r_1\\ &= mU_1I_1\cos(\psi+\theta)-mI_1^2r_1\\ &= mU_1I_1\cos\psi\cos\theta-mU_1I_1\sin\psi\sin\theta-mI_1^2r_1\\ &= mU_1I_q\cos\theta-mU_1I_d\sin\theta-mI_1^2r_1 \end{aligned} \tag{5.10-55}$$

从而可以求得同步转矩

$$\begin{aligned} T &= \frac{P_M}{\omega}=\frac{mU_1I_q\cos\theta-mU_1I_d\sin\theta-mI_1^2r_1}{\omega}\\ &= \frac{mU_1E_0(2r_1^2x_d+x_dx_q^2-r_1^2x_q)\sin\theta+mU_1E_0(2r_1x_q^2+r_1^3-r_1x_dx_q)\cos\theta-mE_0^2(r_1x_q^2+r_1^3)}{\omega(r_1^2+x_dx_q)^2}+\\ &\quad\frac{mU_1^2(x_d-x_q)[(x_dx_q-r_1^2)\sin2\theta+r_1(x_d+x_q)\cos2\theta-r_1(x_d-x_q)]}{2\omega(r_1^2+x_dx_q)^2}\\ &= T_e+T_{dq} \end{aligned} \tag{5.10-56}$$

上式中第一项 T_e 为基本电磁转矩，由励磁磁通产生，其大小与励磁电势 E_0 大小有关。第二项为由 $x_d\neq x_q$ 所引起的磁阻转矩，形式上与普通同步电动机的磁阻转矩相同，由于轴向励磁低速同步电动机中 $x_d<x_q$，所以反应转矩与一般同步电动机的磁阻转矩相反。另外要注意 $\omega=\frac{2\pi f}{p}\Big/\left(k_t\frac{2\pi f}{Z_2}\right)$。

基本电磁转矩 T_e 又可分为两部分

$$T_e=T_{e1}\sin(\theta+\alpha_1)-T_{e2} \tag{5.10-57}$$

式中，$\alpha_1=\arctan\frac{r_1(2x_q^2+r_1^2-x_dx_q)}{2r_1^2x_d+x_dx_q^2-r_1^2x_q}$；$T_{e1}=\frac{mU_1E_0}{\omega(r_1+x_dx_q)^2}\times\sqrt{(2r_1^2x_d+x_dx_q^2-r_1^2x_q)^2+(2r_1x_q^2+r_1^3-r_1x_dx_q)^2}$；$T_{e2}=\frac{mE_0^2(r_1x_q^2+r_1^3)}{\omega(r_1^2+x_dx_q)^2}$。

磁阻转矩 T_{dq} 也可以表示成两部分

$$T_{dq}=T_{dq1}\sin(2\theta+\alpha_2)-T_{dq2} \tag{5.10-58}$$

式中，$\alpha_2=\arctan\frac{r_1(x_d+x_q)}{x_dx_q-r_1^2}$；$T_{dq1}=\frac{mU_1^2(x_d-x_q)}{2\omega(r_1^2+x_dx_q)^2}\times\sqrt{(x_dx_q-r_1^2)^2+(r_1x_d+r_1x_q)^2}$；$T_{dq2}=\frac{mU_1^2r_1(x_d-x_q)^2}{2\omega(r_1^2+x_dx_q)^2}$。

在电磁计算中，通常要计算最大电磁转矩，这时可以令 $\frac{dT(\theta)}{dt}=0$，解出对应的 θ_m 后，就可以求得最大电磁转矩。

图 5.10-17 为轴向励磁式低速同步电动机的转矩特性 $T=f(\theta)$ 以及它的每一个转矩分量。图中转矩用基值为 $T_b=mU_1^2/(\omega x_q)$ 的相对值来表示。

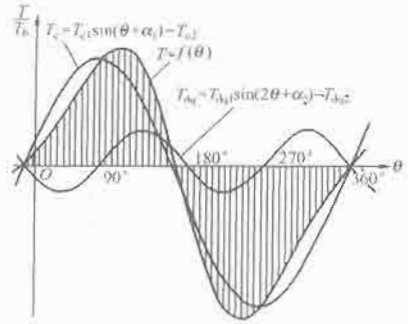


图 5.10-17 轴向励磁式低速同步电动机的转矩特性

4 永磁低速同步电动机的电磁设计要点

4.1 技术要求

提出对电动机的技术要求，作为设计依据。包括：

1）额定数据：定子相数 m_1，电源频率 f，额定电压 U_N，同步转速 n_s，最大同步转矩 T_{max}。

2）供电方式：工频交流电、变频电源。

3）起动方式：空载起动，负载起动，变频起动。

4）瞬时转速稳定度：在某段时间内电动机转速稳定程度。

5）电动机轴与负载轴的连接方式。

此外，还有工作方式（定额）、外形尺寸、安装方式、温升等。

4.2 主要尺寸的确定

主要尺寸指定子铁心内径和铁心长度。为充分利用永磁体，先确定所需永磁体截面，再确定转子外径和定子内径。

4.2.1 转子永磁体尺寸

（1）转子永磁体外径 D_{mo}

永磁体外径用下式确定

$$D_{mo}=\sqrt{\frac{T_{max}}{N_{mm}K_1k_pK_aB_rF_{1\delta}Z_2}}\times10^{-4}\quad(\text{m})\qquad(5.10\text{-}59)$$

式中，T_{max} 为最大同步转矩，N·m；N_{mm} 为转子段数；$K_1=1.0\sim1.1$，为系数；$k_p=0.45\sim0.65$，为脉振系数，转子齿数少，k_p 取大些，齿数多，k_p 取小些；$K_a=0.55\sim0.80$，为永磁体利用系数，磁性机壳与磁性轴，K_a 取较小值，非磁性机壳与非磁性轴，K_a 取较大值；B_r 为永磁体剩余磁感应强度，T；$F_{1\delta}=0.8K_\delta\delta B_{1\delta}\times10^6/K_{ad}$，为每极气隙磁位差，A。其中，$B_{1\delta}=0.2\sim0.3$，为定子绕组产生的气隙磁感应强度，T，电动机瞬时转速稳定度要求高时，$B_{1\delta}$取小值；δ为气隙长度，m，减小气隙长度可减少定子励磁电流，而且还能提高脉振系数，从而提高电动机的力能指标，但如果气隙过小，则可能由于偏心的存在，会产生较大单边磁拉力，影响电动机起动，并使电动机振动和噪声增加，而且对电机瞬时转速稳定度也不利，可根据经验参考表5.10-1初选气隙长度：$K_\delta=3\sim4.5$，为气隙系数，转子齿数多，K_δ 取小些，转子齿数少，K_δ 取大些；$K_{ad}=1-K_p^2/2$，为d轴电枢反应系数；$Z_2=60f/n_s$，为转子齿数。

表 5.10-1 气隙长度初选表 单位：mm

定子外径	55	70	90	110	130	150	170	190
气隙长度	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20

（2）永磁体内径 D_{mi}（m）

选择永磁体内径 D_{mi} 需考虑永磁体导磁面积和转轴机械强度。

（3）永磁体磁化方向长度 l_m（m）

永磁体磁化方向长度 l_m 与永磁体矫顽力 H_c（A/m）和所需励磁磁动势 F_2（A）有关。

采用磁性机壳时

$$l_m=(5\sim8)\frac{F_2}{H_c}\qquad(5.10\text{-}60)$$

式中，$F_2=2F_{2\delta}$，$2F_{2\delta}=1.6B_{2\delta}K_\delta\delta\times10^6$，为气隙磁位差，A。$B_{2\delta}=0.18\sim0.25$，为永磁体在气隙中产生的平均磁感应强度，T。

设计时，$B_{2\delta}$和 $B_{1\delta}$需控制在合理范围内，如 $B_{2\delta}$和 $B_{1\delta}$大于上述给定范围，两者在定、转子齿部叠加后可能使齿部处于过饱和状态，齿部过饱和会增加定子绕组励磁电流，增加电动机运行时的振动和噪声，对电动机的力能指标及运行平稳性不利。如 $B_{2\delta}$和 $B_{1\delta}$太低，则电动机材料利用率不高。

采用非磁性机壳时

$$l_m=(3\sim4)\frac{F_2}{H_c}\qquad(5.10\text{-}61)$$

式中，$F_2=2F_{2\delta}+F_c$，$F_c\approx0.056B_\delta l_{j1}\times10^6$，为定子铁心轴向磁位差，A；$B_\delta=0.2\sim0.3$，为转子永磁体在定子铁心中产生的轴向磁感应强度，T；l_{j1}为定子铁心轴向磁路等效长度，m。

4.2.2 转子磁轭尺寸

（1）磁轭外径

$$D_2=\frac{D_{mi}}{1-2\dfrac{h_{j2}}{D_{i1}}-\dfrac{2\pi}{Z_2}\dfrac{h_{t2}}{t_2}}\quad(\text{m})\qquad(5.10\text{-}62)$$

式中，t_2 为转子齿距，m；h_{t2}为转子齿高，m；h_{j2}为转子轭高，m；D_{i1}为定子内径，m。

初选时可取 $h_{t2}/t_2=0.35\sim0.45$，$h_{j2}/D_{i1}=0.07\sim0.1$。

（2）转子轭长度

转子轭长度按下式选择

$$l_{j2}=K_1D_2\frac{B_r}{B_{2\delta}}K_a\quad(\text{m})\qquad(5.10\text{-}63)$$

式中，$K_1=0.1\sim0.35$，为系数，转子齿数少时取小值，转子齿数多时取大值。

4.2.3 定子铁心尺寸

（1）定、转子齿数

在永磁低速同步电动机中，定子冲片一般有两种型式，如图5.10-18所示。图5.10-18（a）中冲片与普通交流电动机定子冲片相似，定子齿槽均匀分布，但槽口尺寸较大。图5.10-18（b）中冲片为大小齿结构，每个大齿上有若干小齿，定子绕组分布在大槽中。采用大小齿结构的目的是增加定转子齿数以降低电动机的同步转速。大小齿结构又有两种情况，一是小齿槽沿圆周连续分布，大槽槽口处缺一个小齿；另一为根据步进电动机原理设计的步进式冲片，小齿槽不连续分布，定子齿距等于转子齿距。步进式低速电动机可以采用步进电动机冲片，此处不作分析。

选取定子槽数时，必须使定子槽能安放一个对称的多相定子绕组，所以，电源频率、同步转速、极对数、定子槽数、转子槽数之间应满足下述关系

$$\left.\begin{aligned}n_s&=\frac{60f}{Z_2}\\Z_2&=Z_1\pm p=Z_dK_c\pm p\\Z_d&=2m_1pq\end{aligned}\right\}\qquad(5.10\text{-}64)$$

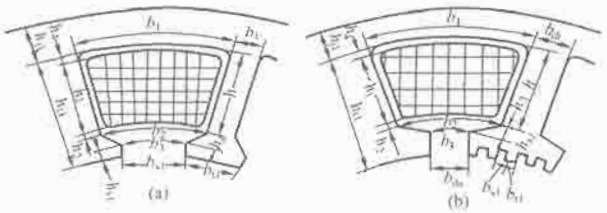


图 5.10-18　定子铁心冲片结构图
（a）定子齿槽均布；（b）大小齿结构

式中，Z_d 为定子大齿齿数（槽数）；Z_1 为定子小齿齿数；q 为每极每相槽数（大齿齿数），为减小定子绕组谐波磁动势，一般取整数；$K_c=Z_1/Z_d$ 为定子小齿数与大齿数之比；极对数取 $p=2$ 或 3，$p=1$ 时会产生单边磁拉力，对电动机的自行起动以及运转的平稳性都有影响，一般不采用。

例如，定子冲片采用图 5.10-18（b）结构，$Z_2=50$，$m_1=2$，$p=2$，$Z_d=8$，每个大齿上有 6 个小齿时，$Z_1=48$。为了便于嵌线而加宽大槽槽口宽度，每个大槽槽口占去了一个小齿，大齿上只留 5 个小齿，小齿齿距不变。这并不破坏电动机的运行原理，但会影响电机的出力。

在图 5.10-18（b）的结构中，K_c 取整数时，大齿均匀分布，每个大齿下的小齿分布相同，两相磁路完全对称。有时为了获得某种转速，K_c 不能设计成取整数，例如电源频率 $f=60$Hz，为了获得 $n_s=60$r/min 的同步转速，转子齿数 $Z_2=60f/n_s=60$r/min，当 $p=2$ 时，定子齿数 $Z_1=58$。采用大小齿结构，$m_1=2$，$Z_d=8$，则 $K_c=58/8$ 为非整数。这时大齿之间有的相隔 8 个小齿，有的相隔 7 个小齿。这样，一方面造成极与极之间分布不均匀，使定子磁动势谐波增加；另一方面还会使两相绕组在空间位移不为 90°，形成了空间不对称的两相绕组。这对电动机性能及瞬时转速稳定度均不利。当 K_c 为非整数时，对定子小齿的布置，应尽可能使两相绕组的磁路对称。

表 5.10-2 给出了 $f=50$Hz，$m_1=2$，$p=2$ 或 $p=3$，K_c 为整数时，与不同转速相对应的定、转子齿数。由表可见，对同一转速，定子冲片可以设计成不同型式。如，$f=50$Hz，$n_s=60$r/min，定子冲片可以设计为 $Z_d=8$，$Z_1=48$，即 $K_c=6$；当电动机尺寸较大时，也可以设计为 $Z_d=16$，$Z_1=48$，即 $K_c=3$，这时定子绕组产生的磁场波形可以得到改善。

表 5.10-2　　不同转速时的定、转子齿数

f (Hz)	p	m_1	K_c	q	Z_2	Z_1	Z_d	n_s (r/min)	转向①
50	2	2	1	1	10	8	2	300	同向
50	2	2	6	1	50	48	8	60	同向
50	2	2	2	3	50	48	24	60	同向
50	2	2	3	2	50	48	16	60	同向
50	2	2	4	1	30	32	8	100	反向
50	2	2	2	2	30	32	16	100	反向
50	3	2	1	1	15	12	12	200	同向
50	3	3	1	1	15	18	18	200	反向

① 同向表示与定子旋转磁场转向相同，反向表示与定子旋转磁场转向相反。

低速同步电动机的定、转子齿槽数不宜取得太少，可采用提高频率的方法来提高转速。在一定外形尺寸下，由于制造上的原因，转子齿数又不能选得过多，所以在 50Hz 工频电源时，同步转速就不可能做得很低。如果采用变频电源供电，设计时可以不限定频率，只给定同步转速和定子绕组相数，再按照式（5.10-64）给出的关系确定电源频率和定、转子齿槽数。同步转速给定后，要提高电源频率就需要增加转子齿槽数，这对提高瞬时转速稳定度有利，但电动机能自行起动所允许的转动惯量随电源频率的升高而减小，电源频率的提高会降低电动机自起动能力，故在设计变频电源供电电动机时必须予以考虑。

（2）定子内径

$$D_{i1}=D_2+2\delta \quad (\text{m}) \tag{5.10-65}$$

（3）小齿齿宽和槽口尺寸

定、转子小齿齿宽与齿距的比值 b_t/t 对气隙磁导波形、脉振系数及气隙系数都有很大影响，在选取时需全面考虑。一般情况下，定、转子齿宽可按下述原则选取

定子大小齿结构　$\dfrac{b_{t1}}{t_1}=0.38\sim0.4$

转子　$\dfrac{b_{t2}}{t_2}=0.42\sim0.45$

式中，b_{t1}、b_{t2} 分别为定、转子小齿齿宽，m；$t_1=\pi D_{i1}/Z_1$、$t_2=\pi D_2/Z_2$ 分别为定、转子小齿齿距，m；定子边 $b_{t1}/t_1=0.38\sim0.4$ 时，对 3 次和 5 次谐波有较大削弱；转子边 $b_{t2}/t_2=0.42\sim0.45$ 时，对 2 次和 4 次谐波有较大削弱。

定、转子小齿槽口尺寸可取

$$\left.\begin{aligned}\frac{h_{s1}}{b_{s1}}&=1\sim1.4\\ \frac{h_{s2}}{b_{s2}}&=0.7\sim1.4\end{aligned}\right\}$$

式中，b_{s1}、b_{s2} 分别为定、转子小齿槽口宽，m；h_{s1}、h_{s2} 分别为定、转子小齿槽口高，m，通常对小齿距电动机取大的比值，对大齿距电动机取小的比值。

（4）定子大齿齿宽和齿高

磁极极身（大齿）磁感应强度要比齿部的低些，极身宽度要大于一个大齿中所有小齿宽度之和，一般大齿齿宽为

$$b_{dt}=1.2K_cb_{t1} \quad (\text{m}) \tag{5.10-66}$$

因为边缘小齿的磁通要转弯后进入极身，故大齿齿顶要有一定高度，一般取

$$h_{ds}\approx2h_{s1} \quad (\text{m}) \tag{5.10-67}$$

大齿齿顶角 α 的选取，应从磁感应强度及机械强度两方面考虑，一般 $\alpha=20°\sim30°$，这时

$$h_3=\frac{1}{2}\left[\frac{\pi(D_{i1}+2h_{ds})}{Z_d}-b_{dt}-b_3\right]\tan\alpha \tag{5.10-68}$$

在大小齿结构冲片中，大槽上宽为

$$b_2=\frac{\pi[D_{i1}+2(h_{ds}+h_3)]}{Z_d}-b_{dt} \quad (\text{m}) \tag{5.10-69}$$

采用平行齿结构，大槽下宽 b_1 即可确定。

大齿齿高（m）可用下式确定

$$h_{t1}=\frac{1}{2}(b_1-b_2)\cot\frac{\pi}{Z_d}+h_3+h_{ds} \tag{5.10-70}$$

（5）定子冲片外径

定子外径为

$$D_1=D_{i1}+2(h_{t1}+h_{j1}) \quad (\text{m}) \tag{5.10-71}$$

式中，h_{j1} 为定子冲片轭高，m。

轭高主要从机械强度方面考虑选取，一般取 $h_{j1}=(0.1\sim0.2)\tau$，τ 为极距，m。计算得到定子外径后，如需要圆整到标准尺寸，可将轭高 h_{j1} 加以调整。

4.2.4 定子绕组

(1) 绕组型式

当电机为工频交流供电时，定子绕组布置原则与一般交流电机相同，即可以根据定子槽数、相数和极数进行绕组布置。对齿槽均匀分布的定子冲片结构，应尽可能采用短距线圈以改善定子绕组磁动势波形。对大小齿结构的定子冲片，一般采用短距线圈，此时在每个大齿上套一个线圈，且槽内两个线圈边采用左右安放而不是上下放置，这样虽然线圈短距导致绕组因数减小，但嵌线方便，而且也使绕组端部长度减小，铜损耗下降。

(2) 每相绕组匝数

定子绕组每相匝数可按定子绕组电枢反应电动势选取

$$N_1 = \frac{E_1}{2\sqrt{2}fK_{w1}B_{1\delta}\tau(2l_{j2})} = \frac{K_e U}{2\sqrt{2}fK_{w1}B_{1\delta}\tau(2l_{j2})} \tag{5.10-72}$$

式中，E_1 为定子绕组电枢反应磁通在定子绕组中的感应电动势，V；K_e 为满载电动势因数，在 $f=50$Hz 时，一般 $K_e=0.45\sim0.6$；K_{w1} 为绕组因数。

(3) 定子绕组导线截面积

永磁低速同步电动机，空载电流与额定电流在数值上差别不大。为方便起见，可根据空载电流确定定子绕组导线截面积 A_{Cu}，为

$$A_{Cu} = \frac{I_0}{J} \quad (\text{m}^2) \tag{5.10-73}$$

式中，$J=(3.5\sim5.5)\times10^6$ 为定子绕组导线电流密度，A/m²；I_0 为空载电流，A，可由下式选取

$$I_0 = \frac{1.5F_{1\delta}pK_s}{0.45m_1N_1K_{w1}} \tag{5.10-74}$$

式中，$K_s=1.2\sim1.5$，为磁路饱和系数。

4.3 电磁计算

4.3.1 气隙比磁导计算

由本章 3.1 节分析可知，永磁低速同步电动机气隙比磁导除了平均分量 λ_0 外，还有 (Z_2-Z_1) 次、幅值为 λ_1 的基波分量。转子磁通在定子绕组中感应电动势 E_0 以及定子绕组 d 轴和 q 轴电抗 X_{ad} 和 X_{aq} 都与 λ_0 和 λ_1 大小有关。所以分析电动机性能时，首先应对气隙比磁导 λ_0 和 λ_1 进行计算。可按谐波磁导法或齿距磁导法求取。

本章 3.1 节的讨论即为谐波磁导法，推出了定、转子双边开槽时气隙平均比磁导 λ_0 和气隙基波比磁导 λ_1 分别为

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_{\delta0}}{k_{\delta1}k_{\delta2}} = \lambda_{\delta0}\lambda_{s0}^*\lambda_{r0}^* \tag{5.10-75}$$

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_{s1}\lambda_{r1}}{2\lambda_{\delta0}} = \frac{1}{2}\lambda_{\delta0}\lambda_{s1}^*\lambda_{r1}^* \tag{5.10-76}$$

式中，$k_{\delta1}=(5+b_{s1}/\delta)/(5+b_{s1}/\delta-b_{s1}^2/\delta t_1)$，为考虑定子齿槽影响的气隙系数；$k_{\delta2}=(5+b_{s2}/\delta)/(5+b_{s2}/\delta-b_{s2}^2/\delta t_2)$，为考虑转子齿槽影响的气隙系数。

气隙平均比磁导 λ_0 可根据 $\lambda_{\delta0}$、$k_{\delta1}$ 和 $k_{\delta2}$ 由式 (5.10-75) 直接计算求得，或按齿区尺寸比值 b_{s1}/δ 和 b_{s1}/t_1 (b_{s2}/δ 和 b_{s2}/t_2) 查图 5.10-11 得到 λ_{s0}^* 及 λ_{r0}^* 后由式 (5.10-75) 计算求得；式 (5.10-76) 中定子 (转子) 侧有槽，转子 (定子) 侧光滑时的气隙比磁导基波幅值标么值 λ_{s1}^* (λ_{r1}^*)，可按齿区尺寸比值 b_{s1}/δ 和 b_{s1}/t_1 (b_{s2}/δ 和 b_{s2}/t_2) 查图 5.10-12 得到。

齿距磁导法采用磁场近似作图法来计算一个齿距内磁导。气隙齿距比磁导是在单位铁心长度上一个齿距范围内的气隙磁导，用 λ_t 表示。当定、转子都有齿时，气隙齿距比磁导的大小与定、转子齿相对位置有关。永磁低速同步电动机一般定、转子齿数较多，若齿区尺寸选择合适，气隙比磁导在空间分布很接近正弦，高次谐波磁导很小，这时，一个定子齿距比磁导在转子转过一个转子齿时也几乎按正弦规律变化，其中高次谐波也很小。如用 α 表示定子齿中心线和转子齿中心线之间的角位移，若不考虑高次谐波影响，气隙齿距比磁导变化规律可以写为

$$\lambda_t = \lambda_{t0} + \lambda_{t1}\cos(Z_2\alpha) \tag{5.10-77}$$

式中，$\lambda_{t0} = \dfrac{\lambda_{t\max}+\lambda_{t\min}}{2}$，为齿距比磁导平均分量；$\lambda_{t1} = \dfrac{\lambda_{t\max}-\lambda_{t\min}}{2}$，为齿距比磁导基波幅值。

$\lambda_{t\max}$ 为气隙齿距比磁导最大值，发生在如图 5.10-19 所示定子齿与转子齿的中心线重合的位置；$\lambda_{t\min}$ 为气隙齿距比磁导最小值，发生在如图 5.10-20 所示定子齿中心线与转子槽中心线重合的位置。$\lambda_{t\max}$ 和 $\lambda_{t\min}$ 可采用代角法、等效磁路法或有限元法计算。由于代角法计算简单，且计算精度在工程允许范围内，所以在工程上得到广泛应用。

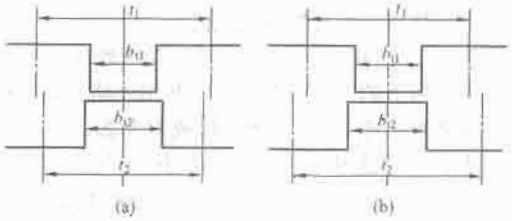


图 5.10-19 最大齿距比磁导发生的位置

(a) $t_1>t_2$，$b_{t1}<b_{t2}$；(b) $t_1<t_2$，$b_{t1}<b_{t2}$

如用代角法计算，对图 5.10-19 (a)，$t_1>t_2$，$b_{t1}<b_{t2}$，最大齿距比磁导为

$$\lambda_{t\max} = \frac{b_{t1}}{\delta} + \frac{\dfrac{t_1-t_2}{\delta}}{1+\dfrac{\beta(t_2-b_{t1}+b_{s2})}{2\delta}} + \frac{1}{\beta}\ln\left[1+\frac{\beta(b_{t2}-b_{t1})}{2\delta}\right]\left[1+\frac{\beta(t_2-b_{t1}+b_{s2})}{2\delta}\right] \tag{5.10-78}$$

对图 5.10-19 (b)，$t_1<t_2$，$b_{t1}<b_{t2}$，最大齿距比磁导为

$$\lambda_{t\max} = \frac{b_{t1}}{\delta} + \frac{2}{\beta}\ln\left[1+\frac{\beta(b_{t2}-b_{t1})}{2\delta}\right] + \frac{1}{\beta}\ln\left[1+\frac{2\beta(t_1-b_{t1})}{2\delta+\beta(b_{t2}-b_{t1})}\right] \tag{5.10-79}$$

在图 5.10-20 所示位置时，$b_{t1}>b_{s2}$，最小齿距比磁导为

$$\lambda_{t\min} = \frac{b_{t1}-b_{s2}}{2\delta} + \frac{2}{\beta}\left(1+\frac{\beta b_{s1}}{2\delta}\right)\left(1+\frac{\beta b_{s2}}{2\delta}\right) \tag{5.10-80}$$

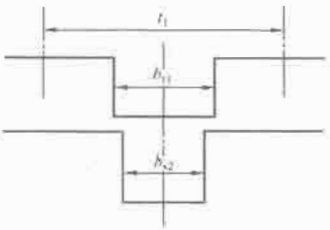


图 5.10-20 最小齿距比磁导发生位置

若令 $\alpha_1=2\pi(Z_2-Z_1)/Z_1$ 为以电角度表示的定子槽距角，则由 λ_{t0}、λ_{t1} 求得 λ_0、λ_1 分别为

$$\lambda_0 = \lambda_{t0}\frac{2(Z_2-Z_1)}{D_{t1}\alpha_1} \tag{5.10-81}$$

$$\lambda_1 = \lambda_{t1}\frac{Z_2 - Z_1}{D_{i1}\sin\frac{\alpha_1}{2}} \tag{5.10-82}$$

4.3.2　磁路计算

永磁低速同步电动机的磁路状态除了与转子永磁体本身磁通大小有关外，还与定子电流所产生的电枢反应磁通有关，即与电动机负载大小有关。计算时通常先进行空载情况下转子磁通的磁路计算，然后再把定子电枢反应磁通的影响叠加在转子磁路磁通之上。

转子磁动势和定子磁动势的计算方法基本相似，即把整个磁路分成气隙、定子小齿与大齿、定子轭、转子齿与转子轭等几部分，分别计算而求取定子绕组所需磁动势 F_1 和转子所需励磁磁动势 F_2，这些磁路计算方法与普通电动机的基本相同。

由定子绕组每对极所需磁动势可计算出电动机的励磁电流

$$I_f = \frac{F_1 p}{0.9 m_1 N_1 K_{w1}} \quad (\mathrm{A}) \tag{5.10-83}$$

空载电流由两部分组成，即与电压相位差 90°的无功电流以及与定子电压同相的空载损耗电流。损耗中转子涡流损耗的计算比较复杂，况且永磁低速同步电动机谐波成分丰富，因而空载电流计算比较困难。工程上，空载电流与电动机铁损耗可按推荐的经验值计算

$$\begin{cases} I_0 = (1.4 \sim 1.6) I_f \\ P_{Fe} = (0.4 \sim 0.6) P_{Cu} \end{cases}$$

4.3.3　定子绕组参数计算

(1) 定子绕组电阻

定子绕组 75℃时电阻为

$$r_1 = 1.22 \times \frac{2\rho N_1 (L_a + L_E)}{A_{Cu}} \quad (\Omega) \tag{5.10-84}$$

式中，L_a 为铁心长度，m；$L_E = \beta_1 K_2 (\pi D_{i1} / 2p)$，为定子绕组端部长度，m；$\beta_1 = y/\tau$，为绕组跨距系数；$\rho$ 为导线电阻率，Ω·m；K_2 为经验系数，可按表 5.10-3 选取。

表 5.10-3　线组跨距系数 β_1 和经验系数 K_2

极数 $2p$	4		6	
绕组跨距系数 β_1	1	≤0.85	1	≤0.85
K_2	1.7～1.9	1.5～1.7	1.9～2.1	1.7～1.9

(2) 定子绕组漏电抗

定子绕组有槽漏磁、端部漏磁和谐波漏磁 3 个漏磁通，定子绕组漏抗计算引入槽单位漏磁导 λ_S、端部单位漏磁导 λ_E 和谐波单位漏磁导 λ_D。定子总单位漏磁导为

$$\sum\lambda = \lambda_S + \lambda_E + \lambda_D \tag{5.10-85}$$

定子绕组相漏电抗为

$$x_1 = C_x \sum\lambda \quad (\Omega) \tag{5.10-86}$$

式中，C_x 为漏抗系数。λ_S、λ_E 和 λ_D 以及 C_x，均可以采用普通交流电动机通用的公式计算。

(3) 电枢反应电抗

电枢反应电抗参见本章 3.3 节。

4.3.4　性能计算

(1) E_1 的校核

由图 5.10-21 所示理想空载相量图，E_1 可用下式求得

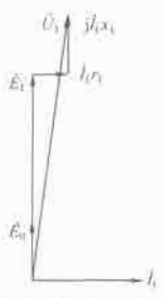


图 5.10-21　理想空载相量图

$$E_1 = \sqrt{U_1^2 - (I_1 r_1)^2} - (E_0 + I_1 x_1) \tag{5.10-87}$$

E_1 的计算值与估算值误差应在 5%以内，否则应重新估计并计算。

(2) 最大同步转矩

根据电磁转矩的表达式，经一定的变换，得到最大同步转矩 T_{max} 的计算式为

$$T_{max} = \frac{m_1}{\Omega_s}\frac{U_1^2}{x_q}\frac{1}{(k+\varepsilon^2)^2}[A\sin(\theta_{max} + \alpha_A) + B\sin(2\theta_{max} + \alpha_A) + C] \tag{5.10-88}$$

式中，$\Omega_s = 2\pi n_s / 60$；$k = x_d / x_q$；$\varepsilon = r_1 / x_q$

$$A = e\{[\varepsilon^2(2k-1)+k]\sqrt{1+\tan^2\alpha_A}\}$$

$$B = (k-1)(k-\varepsilon^2)\sqrt{1+\tan^2\alpha_B}/2$$

$$C = -e^2\varepsilon(1+\varepsilon^2) - \varepsilon(k-1)^2/2$$

$\theta_{max} = \dfrac{\pi}{2} - \dfrac{A\sin\alpha_A + 2B\cos\alpha_B}{A\cos\alpha_A - 4B\sin\alpha_B}$，为发生最大转矩时的功角

$$\alpha_A = \arctan\frac{\varepsilon(2-k+\varepsilon^2)}{k-\varepsilon^2(1-2k)}$$

$$\alpha_B = \arctan\frac{\varepsilon(1+k)}{k-\varepsilon^2}$$

$$e = \frac{E_0}{U_1}$$

为计算方便，有时也写成标么值形式

$$T_{max}^* = \frac{T_{max}}{T_{base}}$$

式中，$T_{base} = m_1 U_1^2 / (x_q \Omega_s)$，为转矩基值，N·m。

(3) 最大输出功率时的效率

最大输出功率也就是发出最大转矩时的输出功率，在永磁低速同步电动机中，最大转矩时定子电流与空载电流相近，可以近似认为最大转矩时损耗等于空载损耗，空载损耗近似为

$$P_0 = P_{Fe} + P_{Cu} = P_{Cu}\left(1 + \frac{P_{Fe}}{P_{Cu}}\right) = (1.4 \sim 1.6) P_{Cu}$$

$$= (1.4 \sim 1.6) m_1 I_0^2 r_1 \quad (\mathrm{W}) \tag{5.10-89}$$

最大输出功率时效率为

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{max} + p_0} = \frac{P_{max}}{P_{max} + (1.4 \sim 1.6) m_1 I_0^2 r_1} \tag{5.10-90}$$

式中，$P_{max} = T_{max}\Omega_s$，为最大输出功率，W。

(4) 永磁低速同步电动机能自行起动所允许的转动惯量 J(kg·m²)

空载时

$$J \leqslant \frac{2T_{max}}{\Omega_s \omega_1} = \frac{2T_{max}}{\Omega_s^2 Z_2} \tag{5.10-91}$$

负载时

$$J \leqslant \frac{2T_{max}}{\Omega_s^2 Z_2}\left[\sqrt{1-\left(\frac{T_1}{T_{max}}\right)^2} - \frac{T_1}{T_{max}}\left(\frac{\pi}{2} - \arcsin\frac{T_1}{T_{max}}\right)\right] \tag{5.10-92}$$

式中，T_1 为负载摩擦转矩，N·m。

5　测试技术与技术标准

低速同步电动机相关测试技术与技术标准请参见 JB/T 3705—1999《永磁低速同步电动机　通用技术条件》。本标准对该型电动机的试验条件、基本参数，如轴向间隙、径向圆跳动、直流电阻、绝缘介电强度、转速、电流、功率、转矩等，以及对环境试验等都做了具体规定。

6 典型产品技术数据

6.1 TDY 系列永磁低速同步电动机

其技术数据见表 5.10-4。

6.2 TYD 系列单相永磁低速同步电动机

TYD 系列单相永磁低速同步电动机是一种无减速齿轮，依靠电动机本身的电磁减速直接得到低转速的同步电动机。该电动机具有低速、大转矩的功率输出，无齿轮减速机构，避免了由此产生的噪声、振动、正反转向间隙和传递误差，提高了系统精度，简化了系统机构，本电动机适合于需要低速恒速直接传动的场合。

型号系列符合 JB 3705—1999 的规定。

其技术数据见表 5.10-5。

表 5.10-4 TDY 系列技术数据

型 号	额定电压 (V)	额定频率 (Hz)	相 数	同步转速 (r/min)	最大同步转矩 (mN·m)	最大输入功率 (W)	最大输入电流 (A)	起动转矩 (mN·m)	外形尺寸 (mm)			质量 (kg)
									总长	外径	轴径	
55TDY4	220	50	1	60	360	16	0.075	200	86	55	7	0.7
55TDY115-1	220	50	1	115	270	16	0.075	150	86	55	7	0.7
70TDY4	220	50	1	60	850	24	0.12	450	110	70	8	1.6
70TDY060-2	220	50	1	60	600	24	0.12	300	110	70	8	1.6
70TDY115-1	220	50	1	115	550	24	0.12	300	110	70	8	1.6
70TDY115-2	220/380	50	三相四线	115	550	24	0.12	300	110	70	8	1.6
70TDY060-3	220/380	50	三相四线	60	850	24	0.12	450	110	70	8	1.6
90TDY4	220	50	1	60	2400	70	0.35	1400	130	90	9	3.2
90TDY115-1	220	50	1	115	1800	80	0.40	800	130	90	9	3.2
90TDY060-3	380	50	3	60	3000	55	0.22	2500	130	90	9	3.2
90TDY060-4	36	50	3	60	3000	55	2.2	2500	130	90	9	3.2
90TDY115-3	220/380	50	三相四线	115	1800	80	0.40	800	130	90	9	3.2
90TDY060-5	220/380	50	三相四线	60	2400	70	0.35	1400	130	90	9	3.2
110TDY4	220	50	1	60	4000	110	0.56	2200	169	110	11	6.0
110TDY060-2	380	50	3	60	5000	85	0.35	4000	169	110	11	6.0
110TDY060-3	220/380	50	三相四线	60	4000	110	0.56	2200	169	110	11	6.0
110TDY115-1	220	50	1	115					169	110	11	6.0
130TDY4	220	50	1	60	6400	140	0.70	3200	177	110	16	9.0
130TDY060-1	220/380	50	三相四线	60	6400	140	0.70	3200	177	110	16	9.0
130TDY115-3	380	50	3	115					177	110	16	9.0

表 5.10-5 TYD 系列技术数据

型 号	电 压 (V)	频 率 (Hz)	同步转速 (r/min)	最大同步转矩 (N·m)	最大输入功率 (W)	最大输入电流 (A)	起动转矩 (N·m)	外形尺寸 (mm)			质量 (kg)
								总长	外径	轴径	
55TYD	A 相 24 B 相 24	50	375		3 3	0.15 0.075	4.9	48	50	3	
55TYD02	220	50	60	0.392		0.15	0.285	84	50	7	
55TYD11	220	50	60	0.255	14	0.07	0.185	84	55	7	
55TYD1	220	50	60	0.372	16	0.07	0.255	86	55	6	
TDY-375	220	50	375	0.00147		0.014	0.00147	35	55	1.5	0.2
TDY-375A	220	50	375	0.00245		0.020	0.00245	31	55	2.5	0.2
64TX1	220	50	120	0.12				85	64		
70TYD11	220	50	60	0.588	18	0.1	0.294	108	70	9	
70TDY4	220	50	60	0.834	25	0.12		110	70	8	
90TDY4	220	50	60	2.35	70	0.35	1.176	130	90	9	
90TYD01	220	50	60	0.882		0.25	0.539	126.5	90	11	
90TYD02	220	50	60			0.30	0.98	126.5	90	11	

续表

型　号	电　压 (V)	频　率 (Hz)	同步转速 (r/min)	最大同步转矩 (N·m)	最大输入功率 (W)	最大输入电流 (A)	起动转矩 (N·m)	外形尺寸 (mm)			质量 (kg)
								总长	外径	轴径	
90TYD11	220	50	60	1.372	40	0.20	0.686	126.5	90	11	
90TYD	220	50	60	1.18	50	0.25		102	90	9	
110TYD	220	50	60	2.45	100	0.50		130	110	11	
110TYD11	220	50	60	2.94	80	0.50	1.47	149/206	110	14	
110TYD12	220	50	60	3.92	108	0.60	1.96	149/206	110	14	
110TDY4	220	50	60	3.92	110	0.60	1.96	156	110	11	
130TYD01	220	50	60	3.92		0.75	2.352	174/239	110	16	
130TYD02	220	50	60	6.37		1.0	3.822	174/239	130	16	
130TYD11	220	50	60	4.41	120	0.70	2.254	174/239	130	16	
130TYD12	220	50	60	6.566	180	1.00	3.332	174/239	130	16	
130TYD	220	50	60	3.92	150	0.75		140	130	16	
150TYD	220	50	60	6.37	190	1.0		157	150	16	
150TYD11	220	50	60	7.84	200	1.20	3.92	214/294	150	22	
150TYD12	220	50	60	9.8	250	1.40	4.9	214/294	150	22	
200TYD11	220	50	60	11.76	300	1.60	5.88	285/395	200	28	
200TYD12	220	50	60	18.62	450	2.40	9.81	285/395	200	28	
200TYD01	220	50	60			1.40		285/395	200	28	
TYD-16	220	50	375	0.0024		0.04	0.0024	30.5	55	2.5	0.16

6.3　TD、TB、TY、TYC、TYJ、TYN 型低速电动机

其技术数据见表 5.10-6～表 5.10-10。

表 5.10-6　　**TD-250 技术数据**

型　号	电压 (V)	频　率 (Hz)	同步转速 (r/min)	输入功率 (W)	相　数	常温起动电压 (V)	高温起动电压 (55℃) (V)	外形尺寸 (mm)			质量 (kg)
								总长	外径	轴径	
TD-250	100	50	250	≤4.2	1	≤58	≤90	19.2	65	4.5/2.8	0.2

表 5.10-7　　**59TD01 技术数据**

型　号	电　压 (V)	频　率 (Hz)	同步转速 (r/min)	空载电流 (mA)	外形尺寸 (mm)			备　注
					总长	外径	轴径	
59TD01	130±5%	3	90	≤17	55	59	3	低频 低速

表 5.10-8　　**TDB 型技术数据**

型　号	电压 (V)	频率 (Hz)	电流 (A)	同步转矩 (N·m)	同步转速 (r/min)
TDB-200-$^{sh}_{sh}$A	220	50	0.13	0.2	60
TDB-3500-1B	40	150	0.80	0.35	180
TDB-25000-sh	220	50	0.25	2.5	15

表 5.10-9　　**TB 型技术数据**

型　号	相　数	电　压 (V)	频　率 (Hz)	同步转速 (r/min)	同步转矩 (N·m)	分相电容 (μF)	分相电阻 (Ω)	外形尺寸 (mm)		
								总长	外径	轴径
160TB01	3	380	50	78	4.9			260	160	16
110TB01	2	220	50	40	0.98	2.5	680		110	8

表 5.10-10 TYJ-24 技术数据

型号	电源电压 (V)	频率 (Hz)	同步转速 (r/min)	同步转矩 (mN·m)	起动转矩 (mN·m)	每相输入电流 (mA)	外形尺寸 (mm)			质量 (g)	备注
							总长	外径	轴径		
TYJ-24	90~110	50	250	≥21.6	≥17.6	<50	65.5	59	4	700	永磁式

6.4 65TYN 型钕铁硼永磁低速同步电动机

其技术数据见表 5.10-11。

表 5.10-11 65TYN 型技术数据

型号	额定电压 (V)	频率 (Hz)	额定电流 (mA)	输出轴转速 (r/min)	输出轴转矩 (N·cm)	外形尺寸 (mm)			
						总长	外径	轴径	减速机
65TYN-250	220	50	180	250	20	55	φ65	φ8	70×70×45
65TYN-109				109	46	100	φ65	φ10	
65TYN-80				80	62	100	φ65	φ10	
65TYN-60				60	83	100	φ65	φ10	
65TYN-40				40	125	100	φ65	φ10	
65TYN-30				30	166	100	φ65	φ10	
65TYN-20				20	250	115	φ65	φ12	90×90×60
65TYN-12.5				12.5	400	115	φ65	φ12	
65TYN-8.3				8.3	600	115	φ65	φ12	
65TYN-5				5	1000	115	φ65	φ12	
65TYN-2.5				2.5	2000	115	φ65	φ12	
65TYN1.7				1.7	3000	115	φ65	φ12	

第11章 磁滞电动机

1 概述

磁滞电动机是一种由交流电源供电、利用磁滞材料产生的磁滞转矩而工作的同步电动机。磁滞同步电动机不同于其他类型的同步电动机，它自身具有起动转矩，能自行进入同步而稳定运转；在某些场合下又可以作异步运转，不像其他类型的同步电动机需要专门的起动绕组或起动装置来产生起动转矩。

1.1 分类

磁滞同步电动机的系列品种、规格较多。按照电源相数可分为三相磁滞同步电动机、两相磁滞同步电动机和单相磁滞同步电动机；按照电源频率可分为工频（50Hz、60Hz）和中频（150Hz、200Hz、300Hz、400Hz、500Hz、1000Hz及1200Hz）磁滞同步电动机；按照定子结构或转子结构以及单相磁滞同步电动机起动方式的分类如图5.11-1所示。



图5.11-1 磁滞同步电动机的分类

在实际应用中，当难以得到适当频率的正弦波交流电源时，可采用方波电源供电，往往也能得到比较满意的使用效果。

1.2 功能与特点

给磁滞同步电动机的定子绕组施加交流电压后，通过定子绕组的电流就会在电动机气隙中产生旋转磁场，在此旋转磁场的作用下，转子磁滞材料产生磁滞转矩，使电动机起动并进入同步运行。磁滞同步电动机作为一种精密的恒速驱动元件，广泛使用于仪器仪表、工业自动化装置、陀螺导航系统和其他一些领域。在电源电压或负载转矩波动时，在一定范围内仍能保持转速恒定不变。此外，磁滞同步电动机还可以在异步状态下连续工作，在控制系统中代替伺服电动机。

与磁阻式、永磁式同步电动机相比，磁滞同步电动机具有以下特点：

1）能自行起动，并能平稳地牵入同步，无需起动绕组或其他起动装置。

2）转子无磁极结构，亦无需预先充磁，其磁极由定子旋转磁场磁化而成，便于设计成多极电动机。

3）从起动、运转到进入同步，从空载运转到输出最大同步转矩，输入电流几乎不变，但功率因数较低。

4）无滑动接触，电动机结构简单，成本较低，运行可靠，机械强度高，运行噪声小。

2 基本工作原理和结构

2.1 基本工作原理

磁滞同步电动机转矩产生的机理如图5.11-2所示。假设转子由实心材料制成，定子是二极永磁体（实际上由旋转磁场产生）。当转子被磁化后，转子中产生的恒定磁场的轴线和定子磁场的轴线重合，定转子间的电磁作用力为径向，如图5.11-2(a)所示，电动机不会产生旋转转矩。

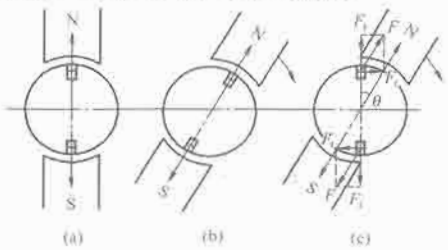


图5.11-2 磁滞同步电动机转矩产生的机理

当定子磁场转动时，若转子由软磁材料制成，由于没有磁滞作用，被磁化的转子磁场轴线也随着定子磁场转动。由于定转子间的作用力是径向的，不会产生转矩，在忽略转子的涡流效应后，转子仍然不会旋转，如图5.11-2(b)所示。如果转子由硬磁材料制成，有着明显的磁滞作用，转子中的无数单元磁体即磁畴受旋转磁化后形成的总摩擦力，力图保持最初的磁化方向，使得转子磁极落后于定子磁极某一角度θ，如图5.11-2(c)所示，一般称此θ角为功角。这样，定转子磁极间的磁拉力除径向分量F_r外，还有一对切向分量F_t，切向分量产生旋转转矩使得转子旋转。由于这一转矩是由磁滞作用而产生的，所以称为磁滞转矩，利用这一原理工作的电动机则被称为磁滞同步电动机。

随着定子磁极（旋转磁场）继续转动，功角θ在增加，与θ成比例的磁滞转矩T_h也在增加，而当定子磁极转过π电弧度后，θ_m保持不变，磁滞转矩T_{hmax}亦保持恒定。

在磁滞转矩的作用下，电动机起动、加速直至进入同步运行状态，与此同时，随着转差率的减小，转子磁化频率也会逐渐减小，进入同步时则等于零。

通常要求磁滞同步电动机具有高的功率密度，也就是一个磁化周期内单位体积磁滞损耗P_h即比磁滞损耗要大。比磁滞损耗可用下式计算

$$P_h = \pi B_m H_m \sin\gamma_m \quad (J/m^3) \tag{5.11-1}$$

式中，B_m为磁滞材料的磁通密度最大值，T；H_m为磁滞材料的磁场强度最大值，A/m；γ_m为磁滞回线的磁滞角。

理想磁滞同步电动机的输出转矩为

$$T = \frac{pP_hV_p}{2\pi} \tag{5.11-2}$$

式中，T为输出转矩，N·m；p为极对数；P_h为比磁滞损

耗，J/m³；V_p为转子磁滞层总体积，m³。

总之，磁滞同步电动机的转矩产生基于转子材料的磁滞效应。从获得最大输出功率而言，希望选用的磁滞材料包含的能量大，即比磁滞损耗 P_h 大，磁滞回线的面积大。起始磁化曲线和磁滞回线如图 5.11-3 所示。

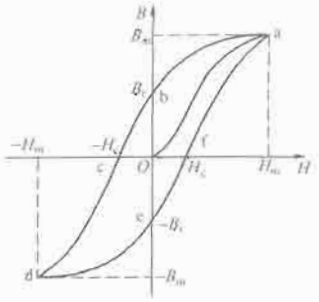


图 5.11-3 起始磁化曲线和磁滞回线

对某一具体材料而言，磁滞损耗的大小依定子绕组所能提供的磁动势而定，即磁滞材料需要一定的磁化功率。因此，最佳设计即在最小磁化功率下获得最大比磁滞损耗值。在实际应用中，通常引入一个回线凸度系数 K_h，它用实际回线面积与理想回线面积的比来表示，即

$$K_h = \frac{S_h}{4B_m H_m} \tag{5.11-3}$$

式中，S_h为磁滞回线面积，T·kA/m；B_m为磁滞材料的磁通密度最大值，T；H_m为磁滞材料的磁场强度最大值，kA/m；$4B_mH_m$为由 $2B_m$ 与 $2H_m$ 组成的长方形面积，T·kA/m。

2.2 结构

除转子主要由磁滞材料制造外，磁滞同步电动机与感应电动机的结构基本相同，也是由定子、转子、端盖等零部件所组成。定子有隐极式、凸极式和爪极式三种结构，转子有叠片式、丝（片）绕式、实心结构以及杯（环）形等结构，还可由磁阻式、永磁式、笼型转子与磁滞转子结合在一起，形成组合式转子。典型的内转子磁滞同步电动机、单相罩极磁滞同步电动机和爪极式单相磁滞同步电动机的结构分别如图 5.11-4～图 5.11-6 所示。

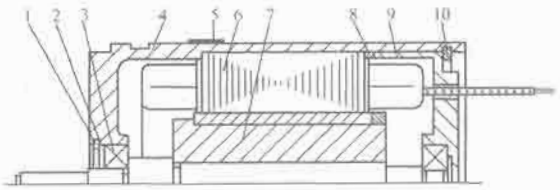


图 5.11-4 内转子磁滞同步电动机
1—挡圈；2—垫圈；3—轴承；4—机壳；5—铭牌；6—定子；7—转子；8—波纹垫圈；9—端盖；10—挡圈

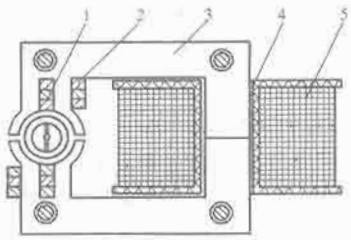


图 5.11-5 单相罩极磁滞同步电动机
1—转子；2—罩极线圈；3—定子铁心；4—线圈骨架；5—定子线圈

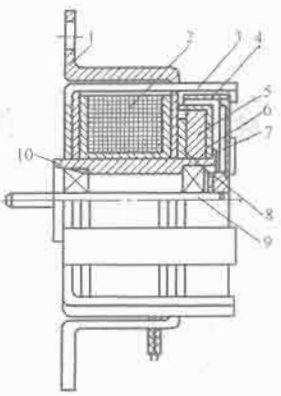


图 5.11-6 爪极式单相磁滞同步电动机
1—支架；2—环形线圈；3—磁极片 a；4—磁滞层环；5—罩极线圈；6—磁极片 b；7—转子支架；8—磁极片 c；9—转轴；10—导磁轴承座

隐极式磁滞同步电动机的定子结构与一般感应电动机没有区别，为开有齿槽的定子铁心内嵌有三相或两相绕组，三相绕组接上三相电源后就会产生旋转磁场，两相绕组或三相绕组接上单相电源并经过电容移相也会产生旋转磁场，典型结构如图 5.11-4 所示。有的单相磁滞同步电动机是利用罩极线圈（短路环）移相来产生旋转磁场，凸极结构的单相罩极磁滞同步电动机如图 5.11-5 所示，爪极结构的单相罩极磁滞同步电动机如图 5.11-6 所示。爪极式单相磁滞同步电动机定子绕组为环形线圈，磁极片为低碳钢钢板冲制而成，转子磁滞环也为板料冲制而成，材料成本低，制造周期短，尤其适合于大批量生产，但这种电动机输出功率很小，一般不会超过 10W。常用于计时装置、继电器、自动记录仪以及工业自动化装置中。定子结构还有其他一些型式，在此就不一一赘述了。

磁滞同步电动机的转子一般由磁滞层、轴套和转轴三部分组成，也有不使用轴套，磁滞层直接套在转轴上的结构，轴套可以是磁性材料制成，也可以由非磁性材料制成，如图 5.11-7 所示。

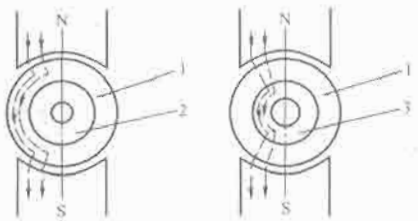


图 5.11-7 非磁性轴套与磁性轴套的转子结构
1—转子磁滞层；2—非磁性轴套；3—磁性轴套

磁性轴套是由导磁性能良好的电工纯铁或低碳钢制成。气隙磁通沿径向穿过磁滞层进入轴套而闭合，磁滞层磁通密度与气隙磁通密度相差无几。磁通穿过磁滞层的磁路长度比较短，呈现出径向磁化状态。非磁性轴套是由不导磁的材料如铝合金、黄铜或塑料等制成。气隙磁通沿切向穿过磁滞层，经过轴套的漏磁通很少。一般来说，磁滞层磁通密度与气隙磁通密度不相等。磁通穿过磁滞层的磁路长度比较长，呈现出切向磁化状态。

两种不同轴套结构的转子，对磁滞层内磁场的分布影响非常显著。一般来说，磁性轴套适用于矫顽力 H_c 高、剩磁 B_r 低的磁滞材料。非磁性轴套则反之。

磁滞层由硬磁材料制成，不需预先充磁，而是靠定子旋转磁场来磁化。磁滞层有实心结构、叠片结构、丝绕或片绕结构、板料拉伸结构等多种型式。实心结构可用棒料或管料车削而成。叠片结构先将板料冲成环形冲片，然后采用胶粘成型或利用工装直接叠压成型，但这种工艺结构的材料利用率较低，经济性很差。为提高材料利用率，可将板料进行套

冲，满足不同机座号电动机的需要。丝绕或片绕结构是先将磁滞材料轧成方丝或薄带，然后将方丝或薄带绕成螺线管状或圆筒状并经热处理后，将端面和内圆磨到配合尺寸，再套到轴套上紧固。采用这种工艺结构后，不仅大幅度降低了有效材料消耗量，还提高了电动机的性能指标。板料拉伸结构适合于电动机直径较大而轴向长度很短的扁平形电动机，板料经落料、拉伸而形成一个环形结构，然后将它套在由非磁性材料制成的转子支架上，就构成了板料拉伸结构的转子，此结构多用于爪极式单相磁滞同步电动机。

3　特性

3.1　起动特性

磁滞同步电动机的机械特性曲线如图 5.11-8 所示。理想磁滞同步电动机的机械特性曲线由互相垂直的两条直线 AB、BC 组成，AB 段对应于异步状态（$0<n<n_1$），电动机的转矩为常数，且等于最大磁滞转矩。BC 段对应于同步状态（$n=n_1$）。此时转速为一恒定不变的同步转速。

实际上，磁滞同步电动机的机械特性曲线与理想机械特性曲线有很大的差异，如图 5.11-8 中曲线 1、2、3 所示。产生这种差异的主要原因是转子涡流与气隙中高次谐波磁场的影响。涡流影响表现在两个方面：一是产生异步附加转矩，可以使磁滞同步电动机的起动转矩提高 50%～120%；二是在同步状态时使转子表面损耗增加，因此使得同步转矩减小，此时的机械特性曲线如图 5.11-8 中曲线 1 所示。一般来说，实心转子的涡流影响较大，而叠片转子的涡流影响则可以忽略不计。

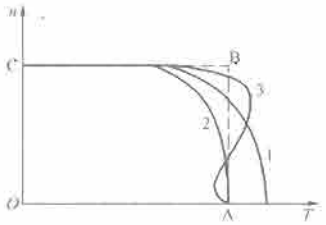


图 5.11-8　磁滞同步电动机的机械特性曲线

除涡流影响外，气隙磁场中高次谐波的影响也不可低估。一般情况下，气隙磁场谐波既有绕组在有限数量槽内分布所引起的空间谐波，又有由于定子齿槽和与此有关的气隙磁导脉动所引起的时间谐波。高次谐波磁动势和转子有效磁滞层相互作用，产生高次谐波的磁滞转矩，和基波一样，这些转矩和电动机的转速无关。总而言之，高次谐波产生的附加转矩会使总的合成转矩减小，如图 5.11-8 中曲线 2 所示。如果定子每极每相槽数 $q=1$ 时，附加转矩的影响就更为明显，从而使机械特性曲线产生明显地下凹现象，如图 5.11-8 中曲线 3 所示。为了减弱这种下凹现象，除了尽可能选择定子每极每相槽数 $q\geqslant 2$ 外，还可选择适当的短距以减小谐波绕组因数。

磁滞同步电动机在同步转速下运行时，定子基波磁动势相对于转子不动，但转子表面磁通密度交变的现象依然存在。这些齿谐波产生磁滞损耗或涡流损耗，对电动机来讲起制动作用。这种转矩不能靠定子绕组的短距或分布来消除，因为齿谐波的绕组因数与基波绕组因数相等，一般采用闭口槽定子冲片或在开口槽的定子铁心上加磁性槽楔的方法，磁性槽楔以电工纯铁或低碳钢制造为好。在气隙长度不超过 0.1mm 时，定子铁心采用闭口槽可明显削弱高次谐波的影响，改善机械特性，提高电动机输出功率。

3.2　运行特性

磁滞同步电动机的工作特性曲线如图 5.11-9 所示。虽然磁滞同步电动机有较好的起动性能，但其力能指标不高，亦即效率、功率因数较低。为了提高磁滞同步电动机的力能指标，改善起动性能，可将磁阻式同步电动机、永磁式同步电动机以及笼型感应电动机的转子与磁滞同步电动机转子组合起来，形成组合转子磁滞同步电动机。

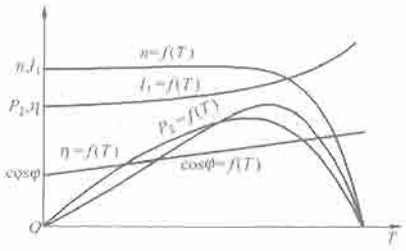


图 5.11-9　磁滞同步电动机的工作特性曲线

（1）磁阻式磁滞同步电动机

磁阻式磁滞同步电动机是组合转子磁滞同步电动机中结构最简单的一种，如图 5.11-10 所示，一种为转子外圆磨平面结构，另一种为转子外圆开槽结构。

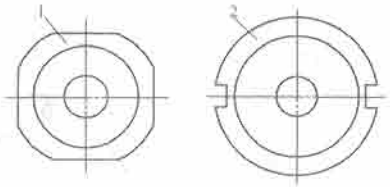


图 5.11-10　磁阻式磁滞同步电动机
1—$2p=4$；2—$2p=2$

外圆磨平面时只需将转子外圆表面磨上几个与电动机极数相等的平面。转子外圆表面磨平后，造成直轴、交轴磁阻不等，即 $x_d\neq x_q$，从而产生同步磁阻转矩。这样，电动机在同步运行时，输出转矩为磁滞转矩和同步磁阻转矩二者之和，电动机的效率和功率因数均有明显改善，而起动时仍依靠磁滞转矩，保留了自起动的优点。

这种设计必须严格控制转子磨平的尺寸，因为转子磨平将使磁滞层截面减小，转子有效层体积缩小，磁滞转矩相应降低，但在截面积减小不多的情况下，由于截面积减小使磁滞层平均磁通密度升高，结果磁滞转矩将略有增加或保持不变。显然，在转子磁滞层还未十分饱和前，减小磁滞层截面积，磁滞转矩将趋向增大，但这时的工作磁通密度已偏离了最佳值，转矩的增加不再与定子电流成正比例关系。当截面积减小太多时，磁滞层过于饱和，造成堵转转矩不但不随定子电流增加而增长，反而减小。

在磁滞环上开槽的结构，常用于 2 极或 4 极电动机。电动机输出功率与开槽的宽度和深度，以及开槽的宽度和深度与磁滞层厚度的比例有密切关系。

显然，转子磨平或开槽后，将造成电动机等效气隙长度增大，从而使磁化电流增加，损耗增大。为避免这一缺点，也有在磁滞环内表面加工平面，从而使 $x_d\neq x_q$ 的，虽然可保证气隙长度均匀不变，但这种结构的制造工艺较为复杂，成本较高。

（2）永磁式磁滞同步电动机

永磁式磁滞同步电动机为永磁同步电动机与磁滞同步电动机的组合体，如图 5.11-11 所示。转子由预先充过磁的永磁体 2 和套在其上的磁滞材料 1 组成。永磁体的极数等于电

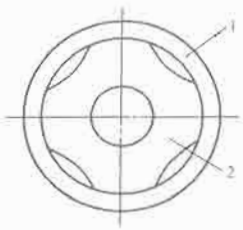


图 5.11-11 永磁式磁滞同步电动机
1—磁滞层；2—永磁体

动机绕组的极数。

这种电动机依靠磁滞转矩起动，若采用星形永磁体，磁极之间浇铸铝合金或嵌有铜条形成短路绕组，则起动时短路绕组中的涡流还会产生异步转矩。这种结构的永磁式磁滞同步电动机，起动转矩是由磁滞转矩与涡流转矩合成的。永磁式磁滞同步电动机的转子磁滞层，在起动过程中受到磁化的情况与普通磁滞同步电动机有所不同，除受到定子绕组反复磁化外，还受到永磁体恒定磁场的磁化，其磁滞损耗与两者的场强有关。一般来说，若设计方案合理，其起动转矩不会小于普通磁滞同步电动机，有时可能还会高些。

永磁式磁滞同步电动机在异步状态下运行时，由于转子永磁体与定子磁场相互作用，产生制动转矩，可能会使机械特性曲线发生下凹。但实践证明，这种下凹并不太大，不会严重影响起动性能。在同步状态下运行时，则转子全部体积都产生同步转矩，即永磁体与定子磁场产生同步转矩，磁滞层在定子磁场磁化下产生磁滞转矩。尽管磁滞层对永磁体产生的磁通有分流作用，但就相同机座号的电动机来讲，它能比其他型式的永磁同步电动机输出更大的功率。

(3) 笼型磁滞同步电动机

笼型磁滞同步电动机的转子结构如图 5.11-12 所示。电动机转子中嵌有笼条，使其堵转转矩比磁滞转矩大得多，可以使起动时间大大缩短，常用于要求快速起动的场合。此外，笼条在电动机同步运行时，还可起到阻尼作用，防止微小的振荡，具有稳定转速的功能。

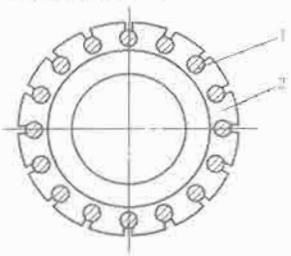


图 5.11-12 笼型磁滞同步电动机
1—笼条；2—磁滞材料

提高堵转转矩的另一种结构，是在转子表面镀铜，一般镀铜厚度为 0.02～0.05mm，堵转转矩可提高 10%～30%。如果在转子表面镀铜的同时增加低电阻端环，采用 T2 铜板或 H62 黄铜板制成端环，电动机的性能将得到进一步提高。

(4) 磁滞制动器

磁滞制动器的原理示意图如图 5.11-13 所示。制动器的内定子与外定子均是有齿槽的导磁体，中间的杯形转子由磁滞材料制成。当环形线圈通过直流电流时，在内、外定子齿上各产生一个同极性的恒定磁场并磁化杯体。当杯体由外力拖动旋转时，杯体磁滞材料在内、外定子恒定磁场的强烈磁滞作用下，产生磁滞转矩。这种磁滞制动器可以在很宽的转速范围内工作，特别是在低速或制动情况下，其转矩与电流之间仍然保持着严格的关系，尤其适合于磁滞测功机，也可用于纺织行业或电线电缆行业，作为张力控制装置。

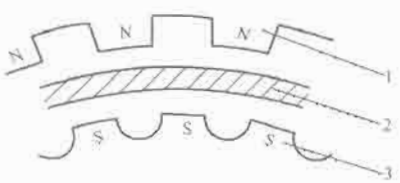


图 5.11-13 磁滞制动器
1—外定子；2—磁滞材料转子杯；3—内定子

3.3 过励状态

磁滞同步电动机正常运行时，由于磁滞材料的磁导率很低，转子磁化程度很弱，需要的励磁电流大，无功功率也就大，导致电动机的力能指标（效率和功率因数）较低。励磁不足，使得磁滞同步电动机实际上是一个欠励状态下运行的同步电动机。

为了改善磁滞同步电动机的力能指标，可以采用过励运行方式，它是磁滞同步电动机的一种独特运行方式。所谓"过励"，就是在电动机起动或同步运行时，短时地（1～2个周期）提高电源电压（通常为额定值的 120%～180%），从而增强定子磁场以加强对转子磁滞层的磁化。具体可采用提高电源电压、方波电源过励、正弦波电源运行，或者串入电容器以补偿电动机电抗的几种方式。据有关资料介绍，国外有学者采用方波电源给磁滞同步电动机供电，并且在电动机运行过程中，定时地瞬间提高励磁电压，以使电动机的效率、功率因数始终保持在较高水平。过励的机理可以用图 5.11-14 来说明。

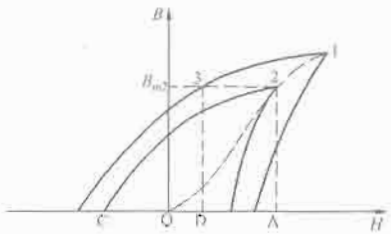


图 5.11-14 过励磁滞同步电动机的工作磁滞回线

当以额定电压 U_N 励磁时，转子工作点位于原磁滞回线的顶点 2 上，该点的磁通密度为 B_{m2}。若提高电源电压，转子工作点即移到新磁滞回线的顶点 1。把电源电压降低到原来的电压 U_N，磁通密度仍降为原来的 B_{m2}，但这是沿着新磁滞回线的下降段到达新的稳定点 3。这样，消耗在转子上的定子磁动势就从 OA 段减小到 OD 段，也就是说，定子励磁电流和输入功率都有所降低，而电动机的效率、功率因数以及牵入转矩则显著提高。电动机不同则过励效果也不尽相同，这不仅与电动机的设计参数有关，更与转子材料及其结构密切相关。事实表明，选用具有"横形"磁滞环（矫顽力 H_c 高、剩磁磁通密度 B_r 低）材料做转子有效层和设计欠饱和的电动机，其过励效果最佳。

应该注意的是，不能在电动机起动前就预先强化转子的磁化。这将使电动机失去起动转矩，成为永磁同步电动机。同时，过励时间过长将导致定子电流剧增，从而使整个电动机总的利用率降低。

3.4 关键技术

磁滞同步电动机的转子有效层部分采用磁滞材料，如铁-钴-钒合金（Fe-Co-V）、铁-钴-钼合金（Fe-Co-Mo）以及马氏体钢等。使用时无需预先充磁，而是在起动过程中由定子旋转磁场磁化，此后就在磁动势大体不变的状态下工作，这和永磁同步电动机的转子需要预先充磁的情况不同，两者的特性差别亦因此而异。

磁滞同步电动机的转矩产生依赖于转子材料的磁滞效应，从获得最大输出功率而言，希望所选的磁滞材料包含的能量大，即比磁滞损耗 P_h 大。但对具体磁滞材料而言，磁滞损耗的大小依据定子绕组所能提供的励磁磁动势而定，即

磁滞材料需要一定的磁化功率。因此，最佳设计是在最小磁化功率下获得最大的比磁滞损耗。

在选择转子磁滞材料时，除必须考虑材料的磁性能外，还必须注意：合金成分变化及热处理温度变化对磁性能的影响；外界温度变化时，磁滞材料、结构材料的线膨胀系数、体膨胀系数是否相近；机械加工对磁性能的不利影响；材料的机械强度以及电阻率等。而磁滞材料的热处理技术是其关键技术。

下面就常用的铁-钴-钒合金（Fe-Co-V）、铁-钴-钼合金（Fe-Co-Mo）以及马氏体钢分别加以介绍。

（1）铁-钴-钒合金（Fe-Co-V）

铁-钴-钒合金在1592～31831A/m的电场强度范围内都具有很高的磁滞性能，基本上满足了磁滞同步电动机工作所需要的电场强度。因此，铁-钴-钒合金是一种比较好的磁滞同步电动机转子材料，是目前国内外使用较为广泛的一种磁滞材料。

我国生产的铁-钴-钒合金，含有52%的钴，而其含钒量分别为13%、12%、11%、10%、9%、7%、5%和3.5%等几种，其余成分则是铁。常用铁-钴-钒合金的牌号有2J3、2J4、2J5、2J7、2J9、2J10、2J11、2J12以及2J13。

铁-钴-钒合金一般制成冷轧钢带，厚度为0.2～0.8mm。也有拉成丝材的，如2mm×2mm方丝。铁-钴-钒合金锻件的磁滞性能低，在这方面不如其他磁滞合金。由于铁-钴-钒合金具有明显的各向异性，沿轧制方向的磁性能明显优于其他方向的磁性能，因此，沿轧制方向拉成丝材的铁-钴-钒合金具有较高的磁滞性能，用这种丝材做转子的磁滞同步电动机，具有较高的效率和功率因数，并大大减少了材料的消耗。

铁-钴-钒合金的性能与热处理温度有着密切的关系，在回火前材料具有良好的塑性，可以冲剪、车削；回火后则变得硬而脆，只能进行磨削加工。不同热处理温度下材料的性能可参考有关手册。在一定范围内改变回火温度，可以获得某一场强下的最好综合性能。

铁-钴-钒合金的回火工艺大致如下：将材料加热到规定的回火温度，一般在520～680℃之间，保温约30～40min，然后放在空气中冷却。

铁-钴-钒合金对回火温度特别敏感，热处理温度偏离一定范围，材料的磁滞性能变化很大，而且随着含钒量的增加，这种关系更为明显，一般要控制温度在±2℃范围内。铁-钴-钒合金中钴和钒比较稀缺，价格昂贵，在电动机指标要求不高的场合，可选用其他磁滞材料。

铁-钴-钒合金的电阻率很大，一般为$(0.5\sim0.7)\times10^{-6}\Omega\cdot m$，因此，当频率为50Hz而钢带厚度小于0.7mm时，涡流损耗通常不大于磁滞损耗的1%～1.5%，实际上可以忽略不计。

铁-钴-钒合金的抗拉强度大约为0.1569MPa，其线膨胀系数和体膨胀系数为$(10\sim12)\times10^{-6}℃^{-1}$，与相应的转子结构材料的热膨胀系数相近。尤其可贵的优点是，在外界温度从－178～200℃时，其性能实际上不发生变化，在设计宽温度范围专用磁滞同步电动机时，铁-钴-钒合金的这一优点尤其重要。

（2）铁-钴-钼合金（Fe-Co-Mo）

与铁-钴-钒合金相比，铁-钴-钼合金的含钴量仅为12%，所以，价格便宜，对热处理温度也不那么敏感。因此，在许多场合可以替代铁-钴-钒合金，尤其在用锻件制造磁滞同步电动机转子时，最好采用铁-钴-钼合金。

目前，国内生产的铁-钴-钼系合金有2J27、2J25、2J23和2J21四种牌号，其含钼量分别为17%、15%、13%及11%，含钴量均为12%。

铁-钴-钼合金在7958～23873A/m的场强范围内具有较高的磁滞性能：最大磁通密度$B_m=0.9\sim1.3T$，比磁滞损耗$P_h=(3.0\sim4.5)\times10^{-2}J/cm^3$，具有中等的回线凸度系数（$K_h\approx0.5$），适合于制造较大功率的磁滞同步电动机。在工作电场强度为8754～11141A/m时宜选用合金2J21，在工作场强为11141～15915A/m时宜选用合金2J23，在工作场强为10345～19894A/m时宜选用合金2J27。

铁-钴-钼合金是各向同性的材料，常加工成棒材或管材。在热处理前可以进行各种切削加工。回火后只能进行磨削加工。铁-钴-钼合金的热处理工艺大致如下：放入1250℃的油中淬火，再根据需要在625～725℃进行回火，保温40～90min，然后放在空气中冷却。

（3）马氏体钢

马氏体钢包括铬钢（如磁钢2J63、工具铬钢7Cr3、轴承钢GCr15等）、钨钢2J64和钴钢等三种，其中以钨钢2J64的磁滞性能最佳，铬钢的磁滞性能次于钨钢，钴钢的磁滞性能与钨钢相似，但工作场强较高。

所有马氏体钢的优点是都能进行切削加工，同时热处理工艺比较简单，磁滞性能与回火温度变化的关系不大。所有马氏体钢的共同缺点是：对外界温度的变化很敏感，特别是在100～150℃的范围内；对机械作用如碰撞、冲击、振动等很敏感。另外，由于组织时效，其磁滞性能随时间会大大降低。

马氏体钢的磁滞性能虽然不高，但它便于加工，而且除钴钢以外，价格便宜，材料成分又非稀缺资源，所以对小功率磁滞同步电动机来讲，其实用价值很大。

1）铬钢。磁钢2J63和工具钢7Cr3、GCr15都属于标准铬钢，采用标准热处理工艺时具有大致相同的磁滞性能，在4775～7162A/m的磁场内，磁滞角正弦的最大值$\sin\gamma_m\approx0.40\sim0.45$。用降低标准铬钢淬火温度的方法，可以把最佳场强的范围移至1989～2387A/m的区域内。在这种情况下铬钢的性能甚至更高，磁滞角正弦的最大值$\sin\gamma_m$达到0.65。铬钢的热处理方法是淬火，而且比较简单。磁滞性能随着热处理温度的改变而平滑地改变。

2）钨钢。钨钢2J64经过标准热处理（820℃以上水中淬火），最大场强为5968A/m，最大磁通密度为1.05T，这时它的磁滞性能比铬钢好得多，磁滞角正弦的最大值$\sin\gamma_m$达到0.61，比铬钢高35%～52%。把淬火温度降低到760℃时，钨钢2J64的最佳场强移到2387A/m的区域，这对于小型磁滞同步电动机是很重要的。不过，在这种情况下的磁滞性能略差一些（$\sin\gamma_m=0.5$）。钨钢的工艺性能与铬钢相似。

3）钴钢。据有关文献介绍，当$\sin\gamma_m=0.58\sim0.70$时，钴钢（含钴量3%～29%）的最佳电场强度为7958～23873A/m。钴钢的性能比铁-钴-钒合金差，而价格和稀缺程度却与铁-钴-钒合金相近，这是其不足之处，一般不宜选用。

4 主要技术指标

1）额定电压。额定电压对三相磁滞同步电动机指电源的线电压，对单相磁滞同步电动机指电源的相电压，一般允差±5%。

2）额定频率。额定频率一般允差±2%。与一般同步电动机一样，磁滞同步电动机的转速与电源频率成正比。

3）堵转转矩。磁滞同步电动机在额定电压、额定频率以及实际冷状态下转子堵转时测得的最小转矩即为堵转转

矩，该转矩应不低于磁滞同步电动机的额定转矩值。

4）牵入转矩。磁滞同步电动机在额定电压、额定频率下达到稳定工作温度后，能将与其相连的负载从静止牵入同步的最大转矩即为牵入转矩，该转矩应不低于磁滞同步电动机的额定转矩值。

5）最大同步转矩。磁滞同步电动机在额定电压、额定频率下达稳定工作温度后，能保持同步运行的最大转矩即为最大同步转矩，该转矩应不低于磁滞同步电动机额定转矩的1.1倍。

6）空载起动电压。磁滞同步电动机在额定频率和空载条件下，转子在任意位置开始连续旋转所需的最小电压即为磁滞同步电动机的空载始动电压。

7）起动时间。起动时间是指转速由零上升到同步转速的95%所需的时间，通常要求在几秒钟到1min之内。

起动时间是表征电动机快速动作的一个参数，在某些应用领域，如陀螺仪和反坦克导弹用的红外测角仪，起动时间是一项十分重要的指标。

当电动机带负载起动时，起动时间不仅取决于电动机本身，而且与负载的转动惯量、摩擦转矩大小密切相关。电动机与负载连接同轴度的好坏亦是个重要因素，不容忽视。

8）效率、功率因数。磁滞同步电动机的转子由磁滞材料制成，而磁滞材料的磁导率仅为普通硅钢薄板的1/50～1/100。磁导率低，所需磁化电流就大，功率因数$\cos\varphi$就很低。从另一方面来看，转子磁化仅仅依靠定子磁动势进行，而定子磁动势又受电动机的温升、体积等限制，不可能很大，因而在同步状态下，转子的磁化程度并不高。磁滞同步电动机实质上乃是一个欠励的同步电动机，所以其效率η、功率因数$\cos\varphi$都比较低，通常$\eta=0.2\sim0.7$，$\cos\varphi=0.2\sim0.6$。

9）转速稳定度。众所周知，同步电动机的同步转速为

$$n_s=\frac{60f}{p} \tag{5.11-4}$$

式中，f为电源频率，Hz；p为电机的极对数；n_s为同步转速，r/min。

对同步电动机而言，同步转速应该是恒定的，但严格地讲，这里所谓的“恒定”是指平均值不变。由于各种因素的影响，同步电动机的瞬时转速实际上并不恒定，存在着一定的变化，转速稳定度就是反映这个变化的一项指标。

根据有关定义，转速稳定度是电动机在一定输入和负载转矩条件下，瞬时转速与理论转速之差对理论转速之比。影响转速稳定度的因素很多，既有设计合理与否、制造工艺水平高低的问题，又有电源与负载方面的原因，而且磁滞同步电动机在不同的使用场合对转速稳定度的要求不尽相同。例如，在录像机中影响图像清晰程度的是角位移误差的大小，这种系统要求转速恒定，最终目的是为了保证位置伺服的精确。而在录音机中，影响音质的因素是转速而非位置，转速的波动导致声音频率发生偏差，使得声音失真。因此，对不同的使用场合，应根据实际使用要求，选择不同的鉴别方法。

10）温升。磁滞同步电动机在额定电压、额定频率下带额定负载或空载同步运行，其定子绕组温度与环境温度之差即为绕组温升。

11）绝缘等级。在一定的绝缘结构下，磁滞同步电动机绕组所允许的最高工作温度即为该电动机的绝缘等级。磁滞同步电动机的常用绝缘等级为B级、F级，相应的绕组允许最高工作温度分别为130℃、155℃。

12）噪声。磁滞同步电动机在额定电压、额定频率下空载同步运行时所产生的声音即为噪声。以A计权声功率级噪声来表示，单位dB(A)。磁滞同步电动机的噪声一般在45～78dB(A)之间。

5 相关技术标准和测试技术

磁滞同步电动机相关技术标准见表5.11-1。

表5.11-1 磁滞同步电动机相关技术标准

序号	标准号	标准名称	被代替标准号
1	GB/T 13139—1991	磁滞同步电动机通用技术条件	GBn 63—1979
2	GJB 789A—1999	磁滞同步电动机通用规范	GJB 789—1989
3	GJB 673—1989	陀螺电机通用规范	—
4	JB/T 1242—1972	TZ系列内转子式磁滞同步电动机	—

磁滞同步电动机的测试与一般驱动用微特电机基本一样，只是在牵入转矩和最大同步转矩的测试中要注意操作细节，以免引入较大的误差。

磁滞同步电动机的基本试验接线图如图5.11-15所示。

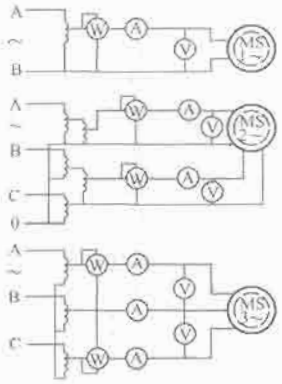


图5.11-15 磁滞同步电动机基本试验接线图

注：① 试验时应选用低功率因数瓦特表；② 单相电机试验所用的电容器，其容量误差应不超过±5%。

测量牵入转矩时，磁滞同步电动机安装在转矩测试设备上，按图5.11-15接线，使其旋转方向符合规定的方向，然后在额定电压、额定频率下空载运行达稳定工作温度。断电，加额定负载，再起动，使其达到同步转速。调整负载转矩大小重复起动，测出使电动机牵入同步的转矩作为牵入转矩，并应重复三次，取其最小值作为牵入转矩值。检查试验时可以在任何工作温度下进行，但应保证稳定工作温度下的牵入转矩符合要求。

测量最大同步转矩时，磁滞同步电动机安装在转矩测试设备上，按图5.11-15接线，使其旋转方向符合规定的方向，然后在额定电压、额定频率下空载运行达稳定工作温度。加载使电动机失步，然后逐渐减小负载，测出使电动机能保持同步的最大转矩值，即为最大同步转矩。

6 设计要点

设计磁滞同步电动机时，首先要根据使用场合对电动机提出的具体设计要求，结合已有的生产条件，确定电动机的基本结构型式，选取转子磁滞材料。然后确定电动机的主要尺寸，如定子内径、铁心长度、气隙长度等。在磁路计算过程中，要确定冲片尺寸、绕组匝数、线径等。最后，对磁路参数、损耗、温升等进行校核，并在此基础上对设计方案作一些修改，使其进一步完善。下面仅就几个主要问题加以叙述。

6.1 定子冲片

为了获得接近于理想正弦波的磁动势波形，每极每相槽数q应取得较大，使磁动势的空间谐波分量减小，避免起动

过程中电动机机械特性的下凹和减小转子中的空间谐波损耗；但每极每相槽数 q 太大，定子槽数增多，将使齿的有效截面减小，槽满率降低。一般来说，在极对数 $p=1$ 时取 $q\leqslant 6$，在 $p=2$ 时取 $q\leqslant 4$，这样将获得大体上近似正弦波的磁动势波形，但至少应使 $q\geqslant 2$。对于定子槽数较少的电动机，q 可取分数槽，以获得与较大 q 值相似的效果。尽可能不取 $q=1$。

45号机座以下电动机多采用闭口槽定子结构，它能比较有效地消除定子齿槽引起的齿谐波磁场在转子中产生的损耗，提高电动机的效率。同时，由于几乎不存在齿谐波，气隙长度可取到0.06mm以下，由于气隙磁位差小，可提高电动机的效率和功率因数。45号机座以上电动机多采用半闭口槽定子结构。这是由于较大机座号电动机定子冲片的槽数 Z_1 可取得较多，齿谐波的次数 Z_1/p 较高，齿谐波的幅值相对较小，而这时的气隙长度一般取得较大，因此齿谐波的影响比较小。此外，大机座号的电动机定子内径也较大，下线操作也比较方便。

对于小机座磁滞同步电动机，为了保证定转子同轴度，常常采用“一刀通”结构，这时的定子冲片内径就必须与轴承外径相协调。为了减小转动惯量，应选用较小的转子外径，但过小的转子外径将使堵转转矩降低，因此，必须全面考虑，合理选择。

定转子冲片材料常选择低损耗硅钢片，如35W270、WTG200，或性能更好但价格也很高的铁镍软磁合金带，如1J50、1J79等。

6.2 转子材料及结构

常用的磁滞材料有铁-钴-钒合金（Fe-Co-V）、铁-钴-钼合金（Fe-Co-Mo）以及马氏体钢等。

从获得最大输出功率而言，希望所选的磁滞材料比磁滞损耗 P_h 大。但对具体磁滞材料而言，磁滞损耗的大小依定子绕组所能提供的励磁磁动势而定，即磁滞材料需要一定的磁化功率。因此，最佳设计亦即在最小磁化功率下获得最大的比磁滞损耗。

在选择转子磁滞材料时，除磁性能外，还必须注意合金成分变化及热处理温度变化对磁性能的影响；外界温度变化时，磁滞材料、结构材料的线膨胀系数、体膨胀系数是否相近；机械加工对磁性能的不利影响；材料的机械强度以及电阻率等。

磁滞同步电动机的各种转子结构可参考2.2节相关内容。

6.3 电磁负荷的选择

选择磁负荷时，应本着定子轭磁通密度不超过定子齿磁通密度，且定子槽面积为最大的原则去考虑。400Hz时定子齿磁通密度应为0.80～1.10T，定子轭磁通密度应为0.65～1.00T，气隙磁通密度应为0.20～0.50T；50Hz时定子齿磁通密度应为1.00～1.30T，定子齿磁通密度应为0.80～1.15T，气隙磁通密度应为0.30～0.60T。

磁滞同步电动机定子绕组电流密度一般为6～10A/mm^2。

6.4 极数的选择

如果没有给定电源频率，且设计人员可以自行选择时，则在给定转速的情况下，内转子电动机做成四极比较理想。因为当采用更高的电源频率并选取更多的极数时，铁损耗的增大值将多于因线圈平均匝长缩短所引起的铜损耗减小值。

陀螺仪用磁滞同步电动机的极数选择问题，或者给定转速来选择频率的问题，需要进行更为详细的分析，可参考有关陀螺仪用磁滞同步电动机的专著。

7 工艺特点

磁滞同步电动机的定子制造工艺与一般三相感应电动机的基本相同。由于转子使用了磁滞材料，使得转子的制造工艺完全不同于普通电动机。除了电磁设计方案对电动机性能指标有着决定性的影响外，磁滞材料的热处理工艺规范及热处理炉的控温精度，将在很大程度上决定着电动机的性能优劣。有关热处理工艺规范可参考3.4节的相关内容，也可查阅其他有关文献。

8 选型和应用

8.1 选型原则

1）首先需考虑磁滞同步电动机的电压、频率、相数与供电电源是否一致，电动机的输出功率、转速是否满足使用要求；再看电动机的外形尺寸、安装尺寸以及重量能否接受。

2）根据不同的使用场合选用不同的转子结构。一般用途优先选用内转子结构的电动机，但若用于转动惯量较大的系统，如陀螺仪、离心机等，则宜选用外转子结构的电动机。如果系统要求频繁起动，最好选用涡流效应大的整体式转子。若要求电动机的力能指标很高而体积又有较多限制，尽可能选用丝绕式或片绕式转子，甚至于采用组合式转子。

3）因磁滞同步电动机的力能指标 $\eta\cos\varphi$ 不高，从节能的角度来看，其输出功率最好不要超过100W。所以，在较大功率的同步传动系统中不宜选用磁滞同步电动机。

4）如果系统对电动机有特殊要求，应预先明确，以便在设计和工艺上采取相应的措施，如选用最合适的磁滞材料，提高转子动平衡精度，选用高精度轴承甚至空气动压轴承，采用更为合适的润滑油或润滑脂。

8.2 应用举例

8.2.1 在陀螺仪中的应用

动力调谐陀螺结构如图5.11-16所示，它由磁滞同步电动机、转子、力矩器、传感器、挠性接头等几个主要部件构成。电动机驱动轴通过挠性接头带动转子高速旋转，在调谐转速下转子为自由转子。当反馈回路闭合时，传感器检测转子的位置，并通过反馈回路由力矩器将转子锁定在相对机壳固定的位置，反馈电流的大小反映了陀螺检测到的角速度的大小。

动力调谐陀螺内部一般充有3040～5066Pa的氦气。但是，低气压容易造成其他物质的挥发和零部件表面吸附气体的溢出，例如，轴承润滑油的挥发，电动机绕组内和其他零件表面吸附气体的溢出等。所以陀螺内部的气体并不是单纯的氦气，而是一种混合气体。随着温度的变化，气体的黏度系数会发生变化，同时，挥发物质挥发的量、零件表面吸附气体的溢出量也会发生变化，因此，陀螺内部气体的成分和压力是不稳定的。当转子高速旋转时，气体介质对它的两种作用力矩-阻尼力矩和动压力矩也会发生变化。

由于陀螺转子与电动动机驱动轴是通过挠性接头连接的，在陀螺工作时很难保证转子旋转轴与电动机驱动轴的同轴度，从而产生一个附加力矩。

鉴于上述问题，从电动机设计角度看，电动机绕组宜采用真空压力灌封绝缘结构，以防止传统绝缘结构中微小空腔中的气体逸出，轴承润滑脂也必须选用气体不易融入的品

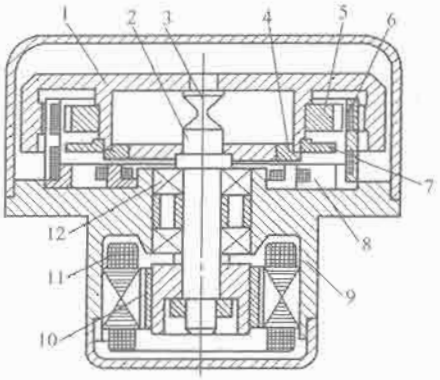


图 5.11-16 动力调谐陀螺结构示意图

1—转子；2—驱动轴；3—挠性接头；4—传感器导磁环；5—力矩器磁钢；6—力矩器线圈；7—限动片；8—传感器线圈；9—壳体；10—磁滞环；11—磁滞同步电动机定子；12—滚珠轴承

种。同时，陀螺转子与电动机驱动轴的连接务必保证其同轴度，以免产生附加力矩，影响陀螺精度。

在影响动力调谐陀螺漂移稳定性的诸多因素中，气体介质成分和压力的变化是一个重要的因素，同时也是最容易被忽视的一个因素。调整陀螺内部气体介质的动压力矩是提高陀螺漂移稳定性的有效方法。

8.2.2 在中央空调电动阀门中的应用

中央空调电动阀门由阀门驱动器和铜阀组成，驱动用电动机外形及安装尺寸见图 5.11-17。该电动机用于控制冷水或热水空调系统管道的开启或关闭，达到控制室温之目的。阀门驱动器由单相磁滞同步电动机驱动，阀门弹簧复位。阀门不工作时处于常闭状态，当需要工作时，由温控器提供一个开启信号，使电动阀接通交流电源而动作，开启阀门，冷冻水或热水进入风机盘管，为房间提供冷气或暖气。当室温达到温控器设定值时，温控器令电动阀断电，复位弹簧使阀门关闭，从而截断进入风机盘管的水流。通过阀门关闭和开启，使室温始终保持在温控器设定的温度范围内。该电动机允许长期堵转，并能在隐蔽式风机盘管装置内常出现的高温环境下可靠工作。中央空调电动阀门用单相磁滞同步电动机主要技术数据如下：

额定电压	220V
额定频率	50Hz
输入功率	≤7W
输入电流	0.035A
绝缘等级	F 级
旋转方向	逆时针
输出转速	5r/min
输出方式	齿轮
空载起动电压	<180V
牵入转矩	>0.06N·m
堵转转矩	>0.06 N·m
断电外动转矩	<0.025N·m
绝缘电阻	100MΩ
绝缘介电强度	1500V、50Hz、1min
耐高电压	275V、50Hz 下持续通电 5min 不得损坏
堵转温升	220V、50Hz 下连续堵转时机壳温升应小于 65K

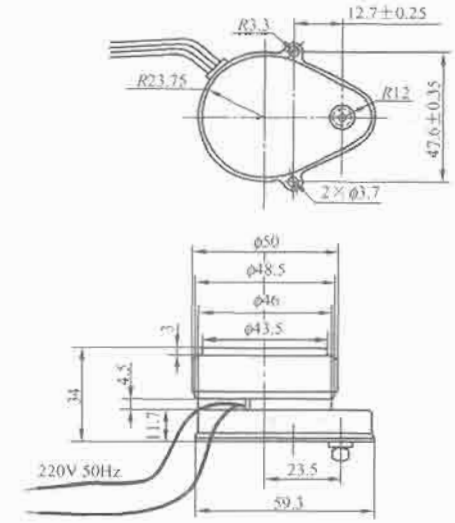


图 5.11-17 电动阀门驱动电动机外形及安装尺寸

8.2.3 其他用途

磁滞同步电动机尚可用于精密计时机构、自动记录仪、录音机、电唱机、传真机、伺服机构以及恒张力传动装置中。

9 典型产品技术数据

磁滞同步电动机典型产品技术数据见表 5.11-2。

表 5.11-2 磁滞同步电动机典型产品技术数据

型 号	额定电压 (V)	相 数	额定频率 (Hz)	同步转速 (r/min)	参考电流 (A)	参考输入功率 (W)	堵转转矩 (mN·m)	额定同步转矩 (mN·m)	输出功率 (W)	重 量 (kg)
28TZ511	12	1	50	3000	0.50	4	1.27	1.27	0.4	0.14
36TZ412	115	1	400	12000	0.10	7	2.30	2.30	3.0	0.2
36TZ413	115	1	400	8000	0.20	15	3.04	3.04	2.5	0.2
36TZ531	110	3	50	3000	0.10	12	4.80	4.80	1.5	0.2
36TZ511	110	1	50	3000	0.13	12	4.80	4.80	1.5	0.2
36TZ512	110	1	50	1500	0.10	10	4.40	4.40	0.7	0.2
45TZ412	115	1	400	12000	0.35	22	6.40	6.40	8	0.4
45TZ531	220	3	50	3000	0.10	20	16.0	16.0	5	0.4
45TZ511	220	1	50	3000	0.12	20	12.7	12.7	4	0.4
45TZ512	110	1	50	1500	0.18	20	12.7	12.7	2	0.4
55TZ531	220	3	50	3000	0.20	35	38.2	38.2	12	0.9
55TZ511	220	1	50	3000	0.20	32	31.9	31.9	10	0.9
55TZ512	220	1	50	1500	0.19	30	31.9	31.9	5	0.9

续表

型 号	额定电压 (V)	相 数	额定频率 (Hz)	同步转速 (r/min)	参考电流 (A)	参考输入功率 (W)	堵转转矩 (mN·m)	额定同步转矩 (mN·m)	输出功率 (W)	重 量 (kg)
55TZS511/2	220	1	50	3000/1500	0.15	30	14.4	14.4	5.0/2.5	0.9
55TZS512/4	220	1	50	1500/750	0.15	32	16.7	16.7	2.6/1.3	0.9
70TZ531	220	3	50	3000	0.45	65	89.0	89.0	26	1.7
70TZ511	220	1	50	3000	0.45	60	64.0	64.0	20	1.7
70TZ512	220	1	50	1500	0.40	60	64.0	64.0	10	1.7
70TZS511/2	220	1	50	3000/1500	0.30	45	31.8	31.8	10/5	1.7
70TZS512/4	220	1	50	1500/750	0.30	45	31.8	31.8	5.0/2.5	1.7
90TZ531	220	3	50	3000	0.80	120	192	192	60	3.5
90TZ511	220	1	50	3000	0.70	100	144	144	45	3.5
90TZ512	220	1	50	1500	0.80	100	192	192	30	3.5
90TZS511/2	220	1	50	3000/1500	0.60	80	76.7	76.7	24/12	3.5
90TZS512/4	220	1	50	1500/750	0.45	80	96	96	15/7.5	3.5
110TZ531	220	3	50	3000	1.75	220	384	384	120	7
110TZ511	220	1	50	3000	1.75	220	287	287	90	7
110TZ512	220	1	50	1500	1.00	150	384	384	60	7
110TZS511/2	220	1	50	3000/1500	1.00	150	147	147	46/23	7
110TZS512/4	220	1	50	1500/750	0.70	100	192	192	30/15	7

第12章 交直流两用电动机

1 概述

交直流两用电动机是指既能在直流电源下工作，又能在交流电源下工作的电动机。为了能在交直流供电下正常工作，设计时会使电动机的输出特性尽量一致。交直流两用电动机在结构上与直流电机类似，采用串励励磁，电枢一般为有槽有铁心结构，导体放置于电枢槽中，满足高速旋转时机械强度的要求。

交直流两用电动机采用交流电源供电时，称为串励交流电动机，采用直流电源供电时，称为串励直流电动机。这种电动机转速高、体积小、重量轻、调速方便，大量应用于小型机床、化工、医疗、自动控制和工业自动化等领域，尤其在电动工具行业中应用更为广泛。此外，大量的家用电器，如真空洗衣机、缝纫机、地板打蜡机、电吹风、吸尘器等也往往选用交直流两用电动机。

交直流两用电动机与一般普通电动机相比较有以下特点。

1）较高的转速。交直流两用电动机可达到20000r/min以上的高速，一般多为4000～10000r/min，若转速低于4000r/min，性能就变差。即使负载相同，在交流电源或直流电源供电时，它的转速也有很大的不同。

2）由于转速高、效率高、功率因数高，因此交直流两用电动机的体积可以做得比同一容量的其他电动机小（高频率的多相电动机除外，这种电动机需要特殊的电源设备）。因此，交直流两用电动机更适应于手提式的电动工具和家用电器。

3）具有较高的起动转矩。转速随负载转矩增加而大幅度下降、而输出功率变化不大。

4）线圈对于电压的适应范围很大，电压在220～250V之间变动时，电动机均可正常工作。

5）制造成本较低，适宜大批量生产。

6）根据负载大小可方便地实现无级调速。

2 基本工作原理和结构

2.1 基本原理

交直流两用电动机的电气原理见图5.12-1。

2.1.1 串励直流电动机工作原理

图5.12-2(a)是串励直流电动机工作原理的示意图。这是一个两极电动机，在定子磁极上放置励磁绕组，用以产生励磁磁通。转子铁心由电工钢片叠成圆环形，导线沿圆环内外表面环绕前进，构成一个闭合回路，这即是电枢绕组。两个磁极之间的对称轴线称为几何中性线，在几何中性线上安放有1对电刷A和B。串励电动机的励磁绕组与电枢绕组是串联连接的。这样，流经励磁绕组和电枢绕组的是同一电流。转子上的载流导体与定子励磁磁场相互作用产生电磁力。电磁力的大小与气隙磁通密度及导体上通过的电流等因素有关。在电磁力的作用下，转子便开始旋转，形成一台串励直流电动机。在实际生产中，电枢绕组采用波绕组或其他绕组型式。与电刷的接触部分由如图5.12-2(b)所示的换向器所取代。

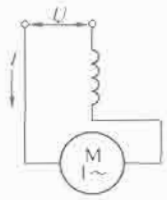


图5.12-1 交直流两用电动机电气原理图

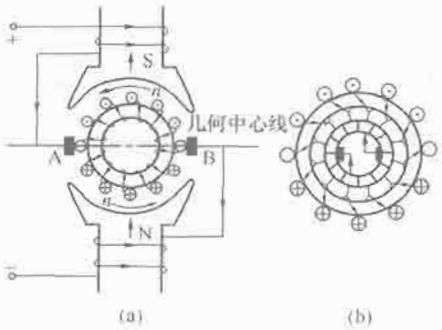


图5.12-2 串励直流电动机工作原理示意图

由上述工作原理可见：

1）一般情况下，电刷都放置在几何中性线上，以避免在相同电流下因电刷偏离几何中性线而造成电动机转矩的减小和正反方向运行特性的偏差。

2）串励电动机的电流经电刷进入转子，随着电动机极对数的增加，电刷的对数也将增加，从而在电枢中形成了多条并联支路。但是，串励电动机的定子励磁绕组和电枢绕组是串联连接的。为了使定子励磁绕组与电枢绕组的发热相当，必须加大定子励磁绕组的截面积。所以，一般串励电动机的定子励磁绕组均较电枢绕组的导线粗。

3）在串励电动机中，所有的电枢绕组串联组成一条闭合回路，而绝不能使其中任何一点断开，否则将严重影响电机的性能。

2.1.2 串励交流电动机工作原理

如果把前述的串励直流电动机接到单相交流电源上，假设电源电压处于正半周时电动机端电压的极性、定子励磁电流 I_f 的方向以及定子磁极主磁通 Φ 和电枢导体中的电流方向如图5.12-3所示，则按左手定律可知，电磁转矩 T_{em} 为逆时针方向。过了半个周期，端电压的极性改变，I_f 和 I 将同时改变方向，随之定子磁极主磁通 Φ 和电枢导体中的电流方向也同时改变。由左手定则可知，此时电磁转矩 T_{em} 的方向将仍然是逆时针方向。因此，从原理上讲，串励电动机是交直流两用的，既可用直流电源供电，也可用交流电源供电。但是，若直接把普通的串励直流电动机改用交流电源供电时，将出现以下问题：

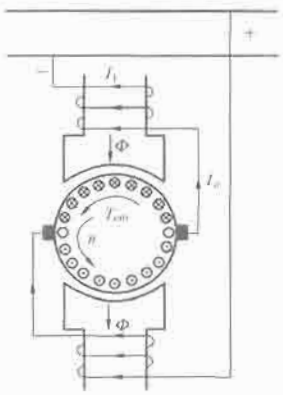


图5.12-3 串励交流电动机工作原理示意图

1）由于定子磁极主磁通 Φ 是交变的，将在定子铁心中产生很大的损耗，使电动机效率下降，温升增高。

2）由于励磁电流和电枢电流都是交变的，它们产生的交变磁场使电动机电路中存在

很大的电抗，致使电动机的功率因数降低。

3）由于交变的定子磁极主磁通 Φ 与被电刷短路的换向元件相交链，在换向元件中感应出变压器电动势。因此在换向元件中存在有旋转电动势、电抗电动势和变压器电动势，从而增加了换向的困难，使电刷与换向器之间产生火花。

为了克服上述问题，串励交流电动机的结构与串励直流电动机相比较，具有如下特点：

1）为了减少铁损耗，定子铁心以及整个磁系统都必须用硅钢片叠成。

2）为了减少励磁绕组的电抗，以改善功率因数，励磁绕组的匝数应适当减少，但为保持所需的磁通，应尽量减少磁路的磁阻。例如，采取性能优良的电工钢片，减小电动机的空气隙等。

3）为了减小电枢绕组的电抗，以改善功率因数，除电动工具用的小容量电动机外，容量较大的单相串励电动机一般都在定子铁心上加装补偿绕组，以抵消电枢反应。

4）为了减少换向困难，可设置换向极，同时还可采用短距绕组和增加虚槽数等措施来改善换向。

2.2　结构

单相串励电动机的结构与小功率直流电动机的相类似，由定子、转子、电刷装置和端盖等部件组成。

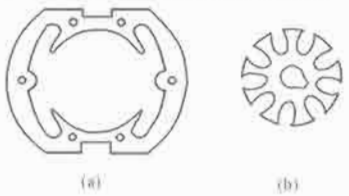


图 5.12-4　定子冲片和转子冲片

(a) 定子冲片；(b) 转子冲片

1）定子。为了减小铁心损耗，定子铁心由电工钢片叠装后铆接而成，如图 5.12-4(a)所示。定子铁心内嵌入励磁绕组并经绝缘处理后构成完整的定子。

2）转子。由转轴、铁心、电枢绕组和换向器等构成。较大功率的电动机一般装有冷却风扇。

转子铁心由电工钢冲片[见图 5.12-4(b)]在转轴上叠装而成，槽内嵌有电枢绕组。电枢绕组的元件通过换向片串联成一个闭合绕组。

在电动工具中使用的单相串励电动机的轴伸端，往往还有经过高频淬火处理的小模数齿轮。

3）电刷装置。一般由热固型塑料粉末模压而成的刷握以及弹簧和电刷等组成。电刷装置的结构应能保证电刷在换向器上有准确位置和在刷握内灵活移动，并使电刷与换向器有密切而恒定的接触，以保持接触压降的恒定。

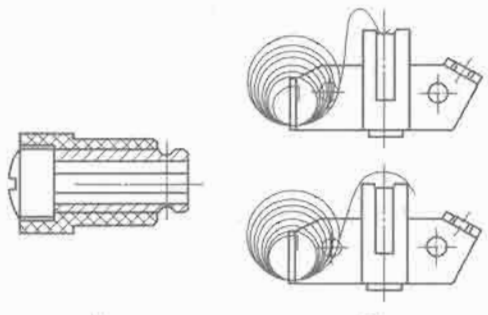


图 5.12-5　单相串励电动机的刷握结构

(a) 管式刷握；(b) 盒式刷握

单相串励电动机的刷握有管式和盒式两种结构。盒式刷握[见图 5.12-5(b)]结构简单，加工要求低，调节方便；缺点是刚性差，变形大，不宜于在高速、振动大的场合应用。管式刷握[见图 5.12-5(a)]具有可靠、耐用等优点，但其加工工艺要求较高。

3　工作特性

3.1　串励直流电动机的基本特性分析

1）反电动势。转子上的载流导体与定子磁场相互作用产生电磁力而使转子旋转。由于转子导体切割定子磁场而产生反电动势。反电动势的计算公式

$$E=\frac{pN}{60a}\Phi n \tag{5.12-1}$$

式中，p 为定子磁极对数；Φ 为定子每极磁通，Wb；N 为转子绕组总导体数；n 为转子转速，r/min；a 为转子绕组并联支路对数。

2）起动电流。在电动机起动的瞬间，转速 $n=0$，反电动势 $E=0$，则电动机起动电流如下式所示。起动电流一般为额定电流的 10～20 倍。

$$I_{st}=U/R \tag{5.12-2}$$

式中，I_{st} 为起动电流；U 为电压；R 为电阻。

3）起动转矩。电动机起动的瞬间，转子中较大的电流与定子励磁绕组中较大的电流所产生的强磁场相互作用，从而产生较大的起动转矩。串励电动机这一优异的特点使它经常被应用于要求起动转矩大的场合。

4）调速。串励电动机可以通过改变电源电压、定子磁通和转子电阻调节转速，以适应不同的负载要求。

5）电磁转矩。电磁转矩的计算公式

$$T=C_T\Phi I \tag{5.12-3}$$

6）机械特性。描述电动机转速 n 随负载转矩 T 变化关系的特性称为机械特性。

由于电动机的定子励磁绕组与转子绕组是串联连接，所以定子磁场是随转子电流的变化而改变的。从式 (5.12-3) 可以看出，当转矩增加时，转子电流必然增加。由于转子电流的增加，又促使定子磁通 Φ 和转子上的电压降 IR 同时加大，使转速 n 显著下降，如图 5.12-6 所示。

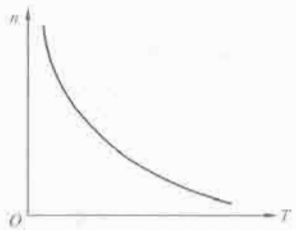


图 5.12-6　串励直流电动机的机械特性

串励直流电动机是一种具有软特性的电动机，也正由于这一特点，使它不容易因负载转矩的增大而过载，而经常使用于负载转矩变化较大的场合。但当负载转矩很小时，电动机的转速很高，因此一般不允许空载运行，以免转速上升到电动机机械强度所不能承受的危险程度。

3.2　串励交流电动机的基本特性分析

1）电磁转矩。串励交流电动机是在交流电源下工作的。如图 5.12-7 所示，一般情况下，电动机电流随时间作正弦变化，而使主磁通 Φ 也随时间作正弦变化。从串励交流电动机的工作原理可知，在电流、磁通同时改变方向的情况下，电磁转矩的方向是不变的。因此，在图 5.12-7 中，无论是对应于电流和磁通的正半周还是负半周，电磁转矩的方向都不变，但由于电流和磁通随时间作正弦变化，因而电磁

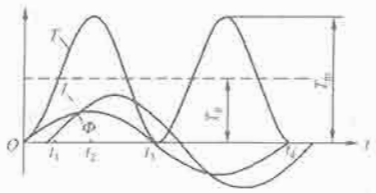


图 5.12-7 串励交流电动机的电磁转矩

转矩 T_{em}的大小也随时间而变化，平均电磁转矩 T_p 与最大转矩 T_m 的关系见下式

$$T_p = \frac{1}{2}T_m \tag{5.12-4}$$

如令 I_m 为交流电流的最大值，Φ_m 为每极磁通的最大值，则最大转矩 T_m 为

$$T_m = K_m \Phi_m I_m \tag{5.12-5}$$

2）相量图和电动势平衡方程式。在交流电路中，电压、电流存在着相位关系，这个关系可用相量图予以明确的表示。

交流串励电动机的定子绕组通过电流以后产生磁通，磁通的大小取决于绕组电流的大小，并且与电流同相位。

转子导体切割定子磁通产生反电动势，反电动势也是随着定子磁通的大小而相应变化，因之与定子磁通也是同相位。

在交流电路中，除去电阻压降还有感抗压降。电阻压降 $\dot{I}R$ 和电流同相位，而感抗压降 $\dot{I}X$ 超前电流 90°，从而可以绘出如图 5.12-8 所示的单相串励交流电动机的相量图。图中 $\dot{E}$ 为电动势相量，$\dot{U}$ 为电压相量，$\dot{I}$ 为电流相量，$\dot{I}R$ 为电阻压降，$\mathrm{j}\dot{I}X$ 为感抗压降。

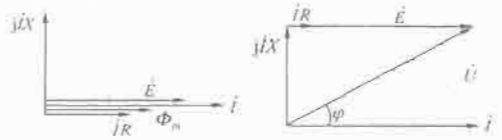


图 5.12-8 单相串励交流电动机矢量图

由图 5.12-8 可写出电动势平衡方程式

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{I}R + \mathrm{j}\dot{I}X \tag{5.12-6}$$

3）转速。当电源频率为 50Hz 时，转速最高的两极感应电动机，其转速也不会超过 3000r/min。而串励交流电动机，虽以同样频率的交流电源供电，却可在高于 3000r/min 的转速下运行。单相串励电动机的转速类似于串励直流电动机的转速，可用下式计算

$$n = \frac{60a}{p}\frac{E}{N\Phi} \tag{5.12-7}$$

由式（5.12-7）可知，可以改变电动机的电磁参数来获得所需要的转速。如磁通 Φ 越大，导体数 N 越多，则转速越低；反之则越高。显然，最直接有效的调节转速的方法是调节电源电压。

4）转速调节。可以采用晶闸管或脉宽调制（PWM）电路来调节单相串励交流电动机的转速。其典型线路如图 5.12-9 所示。

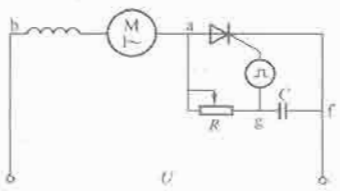


图 5.12-9 单相串励交流电动机的调速线路

在图 5.12-9 中，由于电源是交流电压，正负极性在交替变化，当电源为正半周时，由于控制回路的 $R-C$ 耦合而使电容充电并使主回路的晶闸管触发而导通，使电动机旋转。当电源为负半周时，由于反向电压不能使晶闸管导通，电源不能与电动机接通，因此串励电动机虽然在交流电压下工作，但电动机中流过的只是单向电流（这种情况与电动机在直流电源下的工作情况相类似），此时电动机转速的高低取决于控制回路。例如：可变电阻 R 小时，电容 C 充电过程短，使晶闸管导通角加大，电动机的转速就高；反之转速低。这种调速方法线路简单，实用方便。

5）工作特性。交流串励电动机的工作特性一般可用 3 条特性曲线来表示

$$I = f(T) \tag{5.12-8}$$

$$I = f(n) \tag{5.12-9}$$

$$n = f(T) \tag{5.12-10}$$

由前述可知，电动机的电磁转矩可按下式计算

$$T = C_T \Phi I \tag{5.12-11}$$

式中，C_T 为常数；Φ 为每极磁通；I 为电枢电流。

由式（5.12-11）可知，电动机的转矩 T 取决于每极磁通 Φ 和电枢电流 I 之乘积。在串励电动机中，励磁绕组和转子绕组串联，所以磁通 Φ 又决定于转子电流 I。因此，电动机的转矩 T 正比于转子电流 I 的二次方。图 5.12-10 表示了单相串励交流电动机的转子电流与转矩及转速的关系。曲线中，I 随 T 的增大而增大，但在 T 较大时，由于磁路的饱和，转子电流 I 升高较快，实际上曲线沿虚线上升。

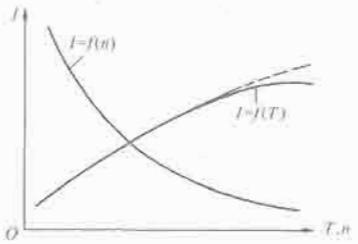


图 5.12-10 单相串励交流电动机的转子电流与转矩及转速的关系

当电源电压恒定时，旋转电动势 E 变化不大，a、p、N 在电动机结构已定的情况下都是不变的，可认为 $60E_a/pN$ 是常数，也可认为 nI 为常数。这表明 $I = f(n)$ 的曲线是一条双曲线，即如图 5.12-10 所示的形状。

从曲线 $I = f(T)$ 及 $I = f(n)$ 中可得到在同一转子电流下的转速 n 和转矩 T 值，因而可以得到如图 5.12-6 所示的 $n = f(T)$ 机械特性曲线。

3.3 交直流两用电动机工作特性的比较

虽然一般认为串励电动机在交流电源与在直流电源供电时有相同的特性，但严格地讲，并不正确。在满载工作时，串励电动机运行于交流电源比运行于直流电源转速要低，而空载时两者转速比较接近，甚至有时在交流电源下的转速反而比在直流电源下高。约在 5000～10000r/min 的转速时，运行于交流电源和直流电源的串励电动机的性能最为接近。一般来讲，电动机的额定转速越低，则运行于交流电源和直流电源时的负载转速相差越大。当转速低于 3000r/min 时，负载转速差别非常明显，尤其在输出功率较小时更加显著。而一般设备在工作时的转速总是比较低的，因此，应用高速串励电动机时，必须装备一套减速齿轮，同时也起到了放大转矩的作用。

串励电动机运行于交流电源和直流电源时，在性能上产生差异的原因是：

1）在交流电源运转时，电动机除了电阻压降之外还有电抗压降，降低了电动机的有效电压。电抗压降与频率、磁通及定、转子线圈匝数的乘积有关，频率越高，电动机的电抗压降越大；当电源频率高于 60Hz 时，即使是特殊设计的电动机，要想在交直流两种电源运行时有相同的性能是很困难的。

在单相串励电动机中，考虑到电抗压降的影响，定子绕组的匝数与磁通量均比有相同输出功率的串励直流电动机少。由于主磁场较弱而转子磁场较强，使换向较为困难。

2）由于磁饱和缘故，直流电流所产生的磁通较之有效值相同的交流电流所产生的磁通量要大。

因为磁饱和与平均磁通密度有关，因此在设计交直流两用电动机时采用较弱的磁场是必要的；但是磁场强度也不能太小，否则将使电动机换向困难，运行不稳定，性能降低。

磁饱和的作用使交流磁场的平均值降低，因此提高了电动机的转速，而转速的提高又可以补偿一部分电抗压降的损失。

磁饱和与频率无关，而电抗则与频率成比例。在低频时，由于电抗作用比较小，有时可能使交直流两用电动机在直流电源上得到较高的转速。

4　主要技术指标和参数

4.1　额定功率

交直流两用电动机的额定功率指电动机输入的电功率。直流电源供电时，额定功率等于电压与电流乘积；交流电源供电时，额定功率为电压、电流及功率因数的乘积。

4.2　额定转速

交直流两用电动机的额定转速为电动机的满载转速。

4.3　温升

由于交直流两用电动机工作转速高，机械摩擦损耗大，所以工作时必须在其绝缘耐热等级所允许的温升下工作。一般在电动机绕组中串接有热保护开关，遇到电动机温升太高时会自行断开电源，以保护电动机绝缘不受损坏。

4.4　功率因数

对单相串励电动机，功率因数是一个重要指标。从电源端来看，功率因数为输入电压与电流间相量夹角的余弦。从使用方面考虑，希望功率因数越高越好。

5　技术标准和测试技术

5.1　技术标准

交直流两用电动机的相关技术标准主要有：

1）GB 8128　《单相串励电动机试验方法》

2）JB 4327　《单相串励电动机技术条件》

3）JB 1135　《G 系列微型单相串励电动机技术条件》

4）JB/T 8157　《小功率单相串励电动机通用技术条件》

5）GB/T 5887　《家用真空吸尘器用单相串励电动机风机技术条件》

5.2　测试技术

交直流两用电动机可看作直流电动机来进行相关性能参数的测试。对输入电源为直流和交流时，按相应的计算公式进行其输入功率的计算和测试。对输出各性能参数的测试，交直流两用电动机是相同的。

6　设计要点

交直流两用电动机设计时的主要参数有：额定输入功率 P_N、额定转速 n_N、额定电压 U_N、额定频率 f_N、最初起动转矩 T_{st0}、最初起动电流 I_{st0}、效率 η、功率因数 $\cos\varphi$。

6.1　主要尺寸与参数选择

（1）定子冲片外径

根据电动机的额定功率和额定转速，可参考表 5.12-1 及表 5.12-2 分别预选一般串励电动机及电动工具用电动机的定子冲片外径。

表 5.12-1　一般串励电动机用定子冲片外径预选表

定子冲片外径（mm）	铁心长度代号	电动机额定功率（W）			
		4000（r/min）	6000（r/min）	8000（r/min）	12000（r/min）
56	1	8	15	25	40
	2	15	25	40	60
	3	25	40	60	90
71	1	40	60	90	120
	2	60	90	120	180
	3	90	120	180	250
90	1	120	180	250	—
	2	180	250	370	—
	3	250	370	550	—
120	1	370	550	—	—
	2	550	750	—	—
	3	750	—	—	—

表 5.12-2　电动工具用电动机定子冲片外径预选表

定子冲片外径（mm）	电动机额定功率（W）	转速（r/min）
50	60 90 120	14000
56	120 150	13000
62	150 180	12000
71	210 250	11000
80	300 350	10000
90	400 500	9000
102	600 800	8000

（2）电枢冲片外径

当电枢长度和转速不变时，计算功率与电枢直径的二次方成正比；但过大的电枢直径会减小定子线窗面积，并使漏磁增大。电枢冲片外径 D_a 一般可在下列范围内选择：$D_a/D_1=0.54\sim0.57$。但电枢圆周速度不能超过 35m/s。

（3）电枢长度

一般电动机转子长径比 L_a/D_a 在 0.7～1.3 之间，电动工具用电动机要求细长，其 L_a/D_a 在 1.0～1.7 之间。

在系列电动机设计时，同一电枢直径可采用两种或三种铁心长度，以得到不同功率。

当 L_a/D_a 较小即电枢铁心较短时，变压器电动势和电抗电动势较小，换向性能较好，电动机冷却条件也较好，但

转动惯量要求小的电动机该比值不能太小。

(4) 气隙长度

为了减小主磁场波形畸变，改善换向，并减小表面损耗，宜选取较大的气隙长度，但过大的气隙会导致励磁安匝增加，力能指标下降和槽满率过高，一般选用0.3～0.8mm，小容量采用低值。正反转电机的气隙长度比上述数据大0.1～0.15mm。电动工具用电动机一般按下式选取

$$\delta=(0.42\sim0.5)\frac{\alpha_p\tau_p A}{10^5 B_\delta}$$

式中，δ为气隙长度，mm；α_p为极弧系数；τ_p为极距，cm；A为电枢线负荷，A/cm；B_δ为气隙磁通密度，T。

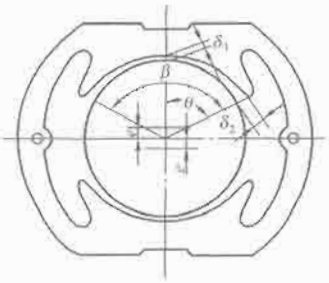


图 5.12-11 非均匀气隙示意图

如图5.12-11所示，采用非均匀气隙可抑制气隙磁场的畸变，减少极尖边缘的磁通量，降低主磁通对换向元件的影响，进而改善换向。

非均匀气隙的等效气隙按下式计算

$$\delta'=\frac{2k_{\delta21}}{k_{\delta21}+1}\delta_1$$

式中，$k_{\delta21}=\delta_2/\delta_1$；$\delta_2$为极尖气隙长度，mm；$\delta_1$为极中心气隙长度，mm。

非均匀气隙的偏心量按下式计算

$$e=\frac{\delta_2-\delta_1}{1-\cos\theta}$$

式中，$\theta=\beta/2$，β为极弧角。

(5) 极弧系数

串励电动机的极弧系数可按下式计算

$$\alpha_p=0.97\beta/180$$

一般串励电动机极弧系数取0.63～0.67，小容量时用小值，电动工具用电动机极弧系数取0.66～0.69。极弧系数小，则材料利用率低；极弧系数过高，会引起换向恶化，漏磁增加。

(6) 电枢槽数

电枢槽数可按下式近似计算后取整数

$$Z_a=(3\sim4)D_a\quad(\text{其中 } D_a \text{ 以 cm 计})$$

目前采用的电枢槽数为9～19，小容量取小值。采用较多的槽数能使导线在电枢圆周上分布得比较均匀，因而转子在不同转角位置上的起动转矩也比较均匀。起动转矩的平均值大，减小了转矩的波动和电动机的振动，并使换向元件的匝数减少，变压器电动势亦减少，有利于改善换向和减少损耗。但槽数过多，会引起模具制造困难和冲槽、下线等工时增加，槽绝缘增加。为减小磁场脉振，改善起动转矩的波动，可以采用奇数槽。为抑制电磁噪声并使转矩均匀，可以采用斜槽，但这时槽的利用率会减小。

(7) 换向片数

换向片数$K=(2\sim3)Z_a$，取$K=3Z_a$比$K=2Z_a$的变压器电动势可减少50%以上，但K值大则其成本高。小功率电动机一般取$K=2Z_a$，换向仍然良好。如果电动机转速较高或要求火花小，可取$K=3Z_a$。

(8) 匝数比（2极）

匝数比可按下式计算

$$a=\frac{4W_s}{N_a}$$

式中，W_s为励磁绕组每极匝数；N_a为电枢绕组总导体数。

当串励电动机采用交流电源时，为了保持适当的功率因数以及尽量减小主磁场的畸变，匝数比一般取0.35～0.45；当交直流两用时，则a可取0.55～0.60。

(9) 电流密度

由于电枢绕组散热较励磁绕组困难，因而电枢绕组电流密度要适当低些。一般串励电动机和电动工具用电动机按表5.12-3选取励磁绕组和电枢绕组电流密度值。容量大者取低值。

表 5.12-3 一般串励电动机和电动工具用电动机电流密度

电机类别	一般串励电动机	电动工具用电动机
励磁绕组电流密度 (A/mm²)	10～12	11～14
电枢绕组电流密度 (A/mm²)	8～10	10～14

(10) 磁通密度

由于尺寸的限制，一般转子齿磁通密度比较高，但磁通密度过高会消耗更多的励磁安匝。转子轭磁通密度比定子轭磁通密度低，这是考虑到转子散热较困难。

定子轭部采用不均等的宽度来取代沿圆周方向的等宽，可使定子轭部铁心横截面增加，因而可减少定子安匝数。磁通密度范围一般采用：

定子磁极磁通密度 $B_m\leqslant0.9$T

定子轭磁通密度 $B_{j1}=(1.6\sim1.75)$T

电枢齿磁通密度 $B_{ta}=(1.65\sim1.75)$T

电枢轭磁通密度 $B_{ja}=(1.4\sim1.75)$T

气隙磁通密度 $B_\delta=(0.35\sim0.6)$T

6.2 单相串励电动机计算

(1) 磁路计算有关公式和有关数据的选择

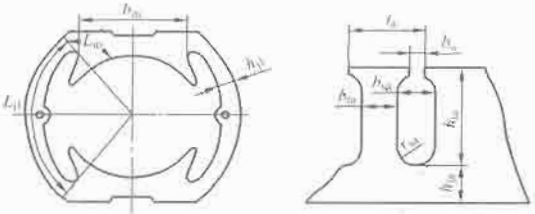
磁路计算有关公式见表5.12-4及图5.12-12。

表 5.12-4 磁路计算

名称	磁通 Φ ($\times10^4$Wb)	截面积 A (cm²)	磁通密度 B (T)	磁路长度 L (cm)	磁场强度 H (A/cm)	磁动势 F (A)	备注
气隙	$\Phi=\alpha_p\tau_p l_{ca}B_\delta$	$A_\delta=\alpha_\delta\tau_p l_{ca}$	$B_\delta=\frac{K_{Fea}b_{ta}B_{ta}}{t_a}$	2δ		$F_\delta=1.6K_\delta B_\delta\delta$	1. 电枢铁心叠压系数K_{Fea}取0.96 2. 齿磁通密度B_{ta}取1.65～1.75T 3. 气隙系数$K_\delta=\frac{t_a+10\delta}{(t_a-b_0)+10\delta}$
电枢齿	Φ		$B_{ta}=\frac{t_a B_\delta}{K_{Fea}b_{ta}}$	$l_{ta}=2h_{ta}$	H_{ta}	$F_{ta}=l_{ta}H_{ta}$	
电枢轭	$\Phi/2$	$A_{ja}=K_{Fea}h_{ja}l_{ca}$	$B_{ja}=\frac{\Phi}{2A_{ja}}$	$l_{ja}=\frac{\pi(D_a-2h_{ta}-h_{ja})}{2p}$	H_{ja}	$F_{ja}=l_{ja}H_{ja}$	

续表

名　称	磁通 Φ ($\times10^{-4}$Wb)	截面积 A (cm^2)	磁通密度 B (T)	磁路长度 L (cm)	磁场强度 H (A/cm)	磁动势 F (A)	备　注
磁　极	$\sigma\Phi$	$A_m=K_{Fem}b_m l_m$	$B_m=\frac{\sigma\Phi}{A_m}$	$2L_m$	H_m	$F_m=2L_mH_m$	1. 磁极铁心叠压系数 K_{Fem} 取 0.96 2. 漏磁系数 σ 取 1.06～1.08
定子轭	$\sigma\Phi/2$	$A_{j1}=K_{Fem}h_{j1}l_m$	$B_{j1}=\frac{\sigma\Phi}{2A_{j1}}$	L_{j1}	H_{j1}	$F_{j1}=L_{j1}H_{j1}$	
每对极磁动势 $\Sigma F=K_{st}(F_\delta+F_{t1}+F_{j2}+F_m+F_{j1})$							安匝系数 K_{st} 取 1.08～1.10



(a)　(b)

图 5.12-12　冲片尺寸

(a) 定子冲片；(b) 电枢冲片

(2) 绕组型式和计算

电枢绕组常用单叠绕组。为改善换向，常将电枢绕组连接到换向片的线头偏移 1～2 片。励磁绕组与一般直流励磁绕组相似，其计算式见表 5.12-5。

表 5.12-5　　绕 组 计 算

名　称	计算式	备　注
励磁绕组每极匝数	$W_s=\frac{\Sigma F}{2\sqrt{2}I_N}$	$I_N=\frac{P_N}{U_N\eta\cos\varphi}$ η 及 $\cos\varphi$ 查表 5.12-6
电枢绕组总导体数	$N_s=\frac{4W_s}{a}$	匝数比 a 见本章 6.1 节(8)

表 5.12-6　　效率及功率因数预选表

功率 (W)	4000r/min		6000r/min		8000r/min		12000r/min	
	η	$\cos\varphi$	η	$\cos\varphi$	η	$\cos\varphi$	η	$\cos\varphi$
8	0.32	0.83	—	—	—	—	—	—
15	0.38	0.83	0.40	0.86	—	—	—	—
25	0.44	0.81	0.45	0.86	0.46	0.88	—	—
40	0.50	0.81	0.51	0.86	0.52	0.88	0.53	0.92
60	0.53	0.80	0.54	0.86	0.55	0.88	0.56	0.92
90	0.56	0.80	0.56	0.86	0.57	0.88	0.58	0.92
120	0.59	0.80	0.60	0.84	0.60	0.88	0.60	0.92
180	0.61	0.79	0.61	0.84	0.62	0.88	0.62	0.92
250	0.63	0.78	0.63	0.84	0.64	0.88	0.64	0.92
370	0.65	0.78	0.65	0.84	0.66	0.88	—	—
550	0.66	0.77	0.67	0.84	0.68	0.88	—	—
750	0.67	0.76	0.68	0.84	—	—	—	—

7　交直流两用电动机换向特点

7.1　换向

交直流两用电动机的换向过程与直流电动机的一样，但因为通过的多半是交流电流，所以换向要复杂得多。一般来说，在交流供电下，换向元件中不仅存在旋转电动势、电抗电动势，还有变压器电动势。前者比例不大，后者占相当大比例，因此使换向情况变坏。但是可以用直流电动机改善换向的方法来改善它的换向，有时还要增加一些措施。常用的有下面几种：

1) 移动电刷位置。采用换向极是改善换向的有效方法，但小容量电机难以采用。此时，往往用移动电刷位置的办法来达到同样的目的。在串励电动机中，只要将电刷逆向移动一个角度，主磁极同时可起换向极的作用。应该指出，移刷后，电动机转速要上升，性能要起变化。

2) 改变换向元件与换向器的接线位置。在带换向极的直流电动机中，换向元件与换向器的接线如图 5.12-13(a)所示。在不带换向极的交直流两用电动机或直流电动机中，为达到换向极的功能，将换向元件置于主极边缘下，如图 5.12-13(b)所示。当然，改变换向元件与换向器的接线方法与移刷方法一样，仅适用于一定的转角，并且换向元件必须置于主极下的恰当位置，否则会使火花加大。图 5.12-13 所示电枢元件为整距或接近于整距时的换向元件与换向器的接线。若元件是短距或长距，其接线方法就有所不同，图 5.12-14 表示短距换向电枢元件时的换向元件与换向器的接线。

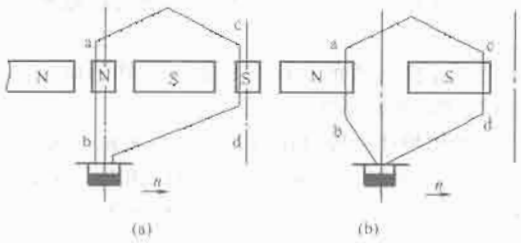


图 5.12-13　整距或接近整距的电枢元件时，换向元件与换向器的接线

(a) 带换向极；(b) 不带换向极

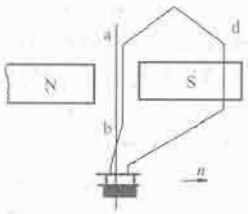


图 5.12-14　短距电枢元件时，换向元件与换向器的接线

3) 特殊结构材料及制造工艺磁路的气隙设计成如图 5.12-11 所示，可以削减换向过程的电动势；选用高电阻电碳材料或碳素纤维等电刷对增加电刷接触电阻和改善换向是有利的。

换向器及电刷的表面状态是影响交直流两用电动机性能及可靠性的一个主要方面。首先换向片选用与电刷耐磨性相匹配的材料，电刷材料应较换向片容易磨损。其次，换向器及电刷表面应加工成光泽镜面，不允许有尖角毛刺，以保证良好接触。因此，要求换向器的表面粗糙度较好，跳动量

0.01mm以下，电刷与换向器的吻合表面应大于80%。

为了使电动机适应长期及各种环境下运行，换向器表面经使用一定时期后，应形成薄薄的氧化层。电刷材料往往经过特殊处理，有时在电刷接触表面上涂一层导电油脂，起保护换向器表面的作用，以改善换向，减少噪声，提高可靠性，延长电动机使用寿命。

7.2 噪声

交直流两用电动机与直流电动机一样，磁拉力的反复变化以及磁性材料的磁伸缩效应均能引起振动，伴随振动而来的就是噪声，这种噪声称为磁噪声。两用电动机在交流励磁下，磁噪声显得特别突出。在磁噪声中，齿槽效应及交流电源产生的磁噪声较大。齿槽效应引起电磁脉动的基本频率处在人耳能够听到的范围内。目前电动工具用串励电动机的基本频率为

$$f_z = \frac{Zn}{60} = 2000 \sim 4000$$

式中，$Z=9\sim16$；$n = 9000 \sim 13500$r/min。

交流供电引起磁噪声的基本频率为

$$f_s = 2f$$

式中，f为交流电源频率。

在带有冷却风扇的交直流两用电动机中，通风噪声是不能忽视的。

降低交直流两用电动机的噪声有许多方法。下面先讨论减弱磁噪声的办法，常用的有：

1）电枢应当采用半闭口槽冲片，槽口应尽可能小，必要时可采用磁性槽楔，以减少齿槽磁导变化引起的磁拉力。

2）选取尽可能大的电枢槽数，并使每极槽数为整数，以降低磁拉力。

3）定子主极极弧的内圆与电枢铁心外圆做成不同心，增大极尖气隙，可减小换向火花。

4）使电枢齿或主极靴扭斜整数倍的齿距，从削弱磁噪声的角度来说，斜槽角度越大越好，但是角度太大，换向恶化，导线利用率低，工艺复杂，故一般电枢槽都是扭斜一个槽距。

5）冲片的磁性材料具有磁伸缩的特性。为了降低噪声，需要采用含硅较高的硅钢片。

6）噪声的根源在于振动。为了减少振动，可采取减振措施，如电动机机壳的金属屏蔽，定、转子的固有振动频率远离振动频率，电刷弹簧片上加减振橡皮等。

通风噪声与通风冷却系统有关。最好的通风型式为轴向通风。为了降低通风噪声，必须选用奇数风扇叶片，如13、17、29、31等。此外，增大转动部分与静止部分间隙，提高风扇刚度及平衡度，均可减少噪声。风叶的形状应按流体形状选取，风扇及风路不应有尖锐边缘和突变的形状，以防止涡流噪声。

7.3 无线电干扰

交直流两用电动机是无线电干扰的强烈来源，它较直流电动机严重得多。这种干扰来源是换向时电刷短路元件中电流迅速变化而引起的。

为了抑制无线电干扰，可对接收干扰的设备采取保护措施，但在干扰源处加以抑制更有效些。在电动机上常用的抑制方法有：

1）使励磁绕组对称分布。图5.12-15将串励绕组分两半与电枢两边相串联，抑制效果显著，可使最大干扰电压减少一个数量级，如原为500μV干扰电压，采用分半串励绕组后，干扰电压降为70μV。

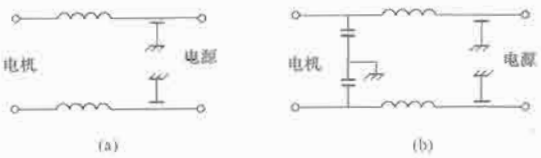


图5.12-15 电气滤波电路

(a) Γ形滤波线路；(b) Π形滤波线路

2）电气滤波是抑制电路干扰的好方法。滤波器应使恒定分量包括电源交流分量畅通无阻。抑制谐波分量，常用的是低通滤波器。图5.12-15（a）所示为Γ形滤波线路。图5.12-15（b）所示为Π形滤波线路。理想情况下，都是给电源的两根导线接上两个相同的滤波器。Γ形滤波器用得普遍，但Π形滤波器效果较好。在很多情况下，用穿心电容器将电源与机壳隔离开来提高滤波效果。

所选的电容器及电感线圈型号规格应与电动机相适应，引出导线往往采用屏蔽电线，屏蔽套应与机壳可靠地连接。当电动机作为单独元件提供时，滤波元件应用专用盒装在电动机内，并屏蔽好。

在交直流两用电动机中，由于结构型式多样，屏蔽方法不能千篇一律，有些可与应用的整机一起加以屏蔽，如电钻工具就将电动机与电钻装在一起加以屏蔽；有些在干扰源局部地方加上屏蔽，如在换向器的外壳用铜网来屏蔽，既可屏蔽干扰，又可作为通风管路用。

上述一些屏蔽措施会使交直流两用电动机的性能有所变化，在电动机设计和应用时，应很好加以考虑。

3）电动机的结构屏蔽是抑制场干扰的好办法。密封金属物是良好屏蔽材料。目前，微特电机的外壳往往用铝或不锈钢来制成，屏蔽效果良好。有些屏蔽要求更高的场合，在电动机外壳另外设置屏蔽罩。

8 选型和应用

8.1 选型

我国研制和生产交直流两用电动机已有较长的历史，已有多种系列、规格的产品，如G系列、GF45型、U型、SU型、UQ型、S型、HC型、HCB型、HCL型等数百个品种、规格的产品。

8.2 应用实例

交直流两用电动机具有较小的起动电流和较大的起动转矩，常用在起动比较困难或者需要大的起动转矩而瞬时断续运行的机构中，如用于操纵控制开关等。通常交直流两用电动机的转速很高。如电动工具用电动机转速达9900～14500r/min，医疗器械用高速离心机上的电动机最高转速可达20000 r/min。因此，在需要高转速的场合，如牙科用钻头、手电钻等就是用这种电动机带动的。

交直流两用电动机的机械特性为软特性，在转矩增加时，转速迅速降低，致使输出功率增加有限，不容易因为负载加大而过载，适用于恒功率控制场合或者负载转矩经常大幅度变化的场所。如在磁带记录器的磁带恒张力机构及自行传动机构中，这种电动机可以取代永磁直流电动机。

当负载很小时，交直流两用电动机转速会很高，所以不

允许全压、空载运行。一般情况下当全压工作时，最低负载应不小于额定值的 25%～30%。

交直流两用电动机常见的有两种使用方法：一种是恒定负载，如电吹风、电动工具，这种场合下使用比较简单，电动机直接与电源相连，也有经过整流器后相连的。还有一种是负载及速度发生变化，此时用起来就较复杂。

交直流两用电动机与直流电动机一样，有三种调节速度的方法。

1）改变电枢回路的电阻。在同一端电压和负载情况下，增加电枢回路的电阻，使转速下降。

2）改变定子主磁通。在定子励磁绕组两端并接一个电阻，或在电枢两端并联电阻来改变主磁通。主磁通下降，转速升高；主磁通增大，转速下降。

3）改变电源电压。这是一种通用方法，可以直接用调压器，也可用晶闸管或其他控制器来改变电源电压。此外，有些场合使用两台电动机，在起动时将两台电动机串联工作，这时，各电动机分担电压是电源电压的一半，可适当限制起动电流，而其加速时间会相对缩小（只要加速到 1/2 全速），即使是轻负荷，也不会过速。串联起动后，再转到并联运行，到达正常运行状态。其实，这种方法是上述三种调速方法的综合运用。

（1）在电钻中的应用

电钻主要由单相串励电动机、减速箱、手柄、钻夹头及电源连接装置等部件组成。电钻中采用的电动机多为单相串励电动机。

交直流两用电钻是利用串励电动机的工作原理进行钻孔加工的电动工具。串励电动机的轴高速旋转，经齿轮减速使钻夹头旋转，从而带动钻头进行钻孔加工。加工大孔时，由于负载较大而转速较低；加工小孔时，由于负载较小而转速较高，从而满足当轴向推力及钻孔直径不同，即负载不同时，其转速也不同的要求。

（2）在低压断路器中的应用

AH 型框架式低压断路器规格较多，额定电流为 600～4000A，最高电压为交流 660V，频率为 50Hz/60Hz，可船用和陆用。合闸方式分为电磁合闸、电动机储能合闸及手动储能合闸。电动机储能合闸方式是使单相串励电动机接通电源高速旋转，经与电动机一体的齿轮箱减速并放大转矩，而使置于电动机减速箱输出轴端的摇柄驱动合闸装置的棘轮及棘爪机构，使合闸弹簧拉伸储能。当合闸弹簧的储能一旦结束，单相串励电动机即自动停止工作。根据控制电压的大小不同，储能时间一般为 3.5～8.5s。在这个短暂的工作过程中，要求电动机有较大的起动转矩，小的机电时间常数，并有良好的工作可靠性。当电源电压在（0.65～1.15）U_e 的大幅度波动条件下，电动机仍要能正常工作。又由于要适应于船用和陆用，不仅环境条件变化恶劣，而且还要满足防潮、防盐雾、防霉菌的三防要求，加之电动机的尺寸还要适应于有限的安装空间，所以对电动机的电气性能、绝缘结构、机械强度和体积提出了较高的要求。

9　典型产品技术数据

1）G 系列微型单相交流串励整流子电动机，其技术数据见表 5.12-7 和表 5.12-8。

表 5.12-7　　G 系列技术数据（一）

型　号	功率（W）	电流（A）	电压（V）	频率（Hz）	转速（r/min）	效率（%）	功率因数	起动转矩/额定转矩	起动电流/额定电流	质量（kg）
G4514	25	0.31	220	50	4000	44	0.81	1.5	2.5	1.25
G4524	40	0.47	220	50	4000	50	0.81	1.7	2.5	1.5
G4516	40	0.42	220	50	6000	51	0.86	1.8	3.5	1.25
G4526	60	0.68	220	50	6000	54	0.86	2.5	3.5	1.5
G4518	60	0.55	220	50	8000	55	0.88	3	4.5	1.25
G4528	90	0.77	220	50	8000	57	0.88	4	4.5	1.5
G45112	90	0.75	220	50	12000	58	0.92	4.5	6	1.25
G45112	120	0.93	220	50	12000	60	0.92	6	6	1.5
G5614	120	1.16	220	50	4000	59	0.80	2	2.5	4.2
G5624	180	1.70	220	50	4000	61	0.79	2	2.5	4.8
G5634	250	2.31	220	50	4000	63	0.78	2	2.5	5.4
G5616	180	1.60	220	50	6000	61	0.84	3	3.5	4.2
G5626	250	2.15	220	50	6000	63	0.84	3	3.5	4.8
G5636	370	3.08	220	50	6000	65	0.84	3	3.5	5.4
G5618	250	2.02	220	50	8000	64	0.88	5	4.5	4.2
G5628	370	2.90	220	50	8000	66	0.88	5	4.5	4.8
G5638	660	4.18	220	50	8000	68	0.88	5	4.5	5.4

表 5.12-8　　G 系列技术数据（二）

型　号	电压（V）	频率（Hz）	电流（A）	功率（W）	额定转速（r/min）	效率（%）	功率因数	起动转矩/额定转矩	起动电流/额定电流
G4514	220	50	0.45	40	4000	50	0.81	1.7	2.5
G4524	220	50	0.64	60	4000	55	0.80	1.7	2.5
G4534	220	50	0.91	90	4000	56	0.80	1.7	2.5
G4516	220	50	0.59	60	6000	54	0.86	2.5	3.5
G4526	220	50	0.85	90	6000	56	0.86	2.5	3.5
G4536	220	50	1.08	120	6000	60	0.84	2.5	3.5
G4518	220	50	0.82	90	8000	57	0.88	4.0	4.5
G4528	220	50	1.03	120	8000	60	0.88	4.0	4.5
G4538	220	50	1.50	180	8000	62	0.88	4.0	4.5
G45112	220	50	0.99	120	12000	60	0.92	6.0	6.0

续表

型 号	电压（V）	频率（Hz）	电流（A）	功率（W）	额定转速（r/min）	效率（%）	功率因数	起动转矩/额定转矩	起动电流/额定电流
G45112	220	50	1.43	180	12000	62	0.92	6.0	6.0
G45312	220	50	1.93	250	12000	64	0.92	6.0	6.0
G5614	220	50	1.16	120	4000	59	0.80	2.0	2.5
G5624	220	50	1.70	180	4000	61	0.79	2.0	2.5
G5634	220	50	2.31	250	4000	63	0.78	2.0	2.5
G5616	220	50	1.60	180	6000	61	0.84	3.0	3.5
G5626	220	50	2.15	250	6000	63	0.84	3.0	3.5
G5636	220	50	3.08	370	6000	65	0.84	3.0	3.5
G5618	220	50	2.02	250	8000	64	0.88	5.0	4.5
G5628	220	50	2.90	370	8000	66	0.88	5.0	4.5
G5638	220	50	4.18	550	8000	68	0.88	5.0	4.5
G7114	220	50	3.32	370	4000	65	0.78	2.0	2.5
G7124	220	50	4.92	550	4000	66	0.77	2.0	2.5
G7134	220	50	6.69	750	4000	67	0.76	2.0	2.5
G7116	220	50	4.44	550	6000	67	0.84	3.5	3.5
G7126	220	50	5.97	750	6000	68	0.84	3.5	3.5

2）HDZ系列单相交、直流两用电动机，其技术数据见表5.12-9和表5.12-10。

表5.12-9　　HDZ系列技术数据（一）

型 号	输出功率（W）	电 流（A）	电 压（V）	频 率（Hz）	转 速（r/min）	效 率（%）	功率因数	起动转矩/额定转矩	起动电流/额定电流	外形尺寸（长×宽×高）（mm×mm×mm）
HDZ-111	240	4	110	50	916	60	0.92	≥6	≤5	341×180×93
HDZ-211	240	2	220	50	916	60	0.92	≥6	≤4.8	341×180×93
HDZ-311	240	1.16	380	50	916	60	0.92	≥6	≤4.4	341×180×93
HDZ-113	240	4	110	50	530	57	0.96	≥6	≤5	217×110×94
HDZ-213	240	2	220	50	530	57	0.96	≥6	≤5	217×110×94
HDZ-313	240	1.16	380	50	530	60	0.92	≥6	≤4.4	217×110×94
HDZ-121	360	5.46	110	50	1100	64	0.92	≥6	≤5	341×180×93
HDZ-221	360	2.73	220	50	1100	64	0.92	≥6	≤5	341×180×93
HDZ-321	360	1.58	380	50	1100	64	0.92	≥6	≤5	341×180×93
HDZ-12	385	5.42	110	50	13200	64	0.90	≥6	≤5	141×84×84
HDZ-22	385	2.71	220	50	13200	64	0.90	≥6	≤5	141×84×84
HDZ-281	90	0.72	220	50	1000	58	0.92	≥4.5	≤5	181×100×72
HDZ-281	120	0.9	220	50	1000	60	0.92	≥4.5	≤5	181×100×72
HDZ-297	200	1.64	220	50	2100	63	0.88	≥5	≤4.5	
HDZ-112	240	4	110	50	338	60	0.92	≥6	≤5	210×178×98
HDZ-212	240	2	220	50	338	60	0.92	≥6	≤4.8	210×178×98
HDZ-312	240	1.16	380	50	338	60	0.94	≥6	≤4.4	210×178×98

表5.12-10　　HDZ系列技术数据（二）

型 号	功 率（W）	电 流（A）	电 压（V）	频 率（Hz）	转 速（r/min）	起动转矩（N·m）	起动电流（A）	外形尺寸（长×宽×高）（mm×mm×mm）
HDZ-111	220	4.2	110		1210	16.8	22	220×96×122
HDZ-211	220	1.8	220	50/60	1210	16.8	14	220×96×122
HDZ-311	220	1.3	380	50/60	1210	16.8	8	220×96×122
HDZ-121	385	6	110		1210	26	32	220×96×122
HDZ-221	385	3	220	50/60	1210	26	18	220×96×122
HDZ-321	385	2.1	380	50/60	1210	26	12	220×96×122
HDZ-111D	170	3	110		1210	14	22	220×96×122
HDZ-221S	220	1.8	220	50	1210	16.8	14	220×96×122
HDZ-311S	220	1.3	380	50	1210	16.8	8	220×96×122
HDZ-121B	385	6	110		1210	26	32	237×150×132
HDZ-411	220	12	24		1210	16.8	80	220×96×122
HDZ-511	220	7.5	60		1210	16.8	36	220×96×122
HDZ-212	220	1.8	220	50	190	70	14	204×210×95
HDZ-113	220	4.2	110		580	29	22	208×110×95
HDZ-213	220	1.8	220	50.60	580	29	14	208×110×95
HDZ-313	220	1.3	380	50.60	580	29	8	208×110×95
HDZ-123	385	6	110		580	44	32	225×110×95
HDZ-223	385	3	220	50.60	580	44	18	225×110×95
HDZ-323	385	2.1	380	50.60	580	44	12	225×110×95
HDZ-213P	220	1.8	220	50	580	29	14	208×113×95
HDZ-223P	385	3	220	50	580	44	18	225×113×95
HDZ-115	220	4.2	110		400	42	22	325×121×100
HDZ-125	385	6	110		400	63	32	334×121×100
HDZ-136	230	4	110		2000	10	30	232×63.5×63.5
HDZ-236	230	1.8	220	50	2000	10	14	232×63.5×63.5
HDZ-22	385	2.7	220	50	13200	2	22	142×100×90
HDZ-25	700	5	220	50	10000	5	36	242×131×131
HDZ-26	250	1.9	220	50	8000	18	14	157×100×100
HDZ-16	250	4	127	50	8000	18	30	157×110×100
HDZ-27	150	1	220	50	10000	1	8	137×82×100
HDZ-297	200	1.6	220	50	8000	14	12	189×82×82

3）HCX 系列单相交流串励电动机，其技术数据见表 5.12-11。

表 5.12-11　　HCX 系列技术数据

型　号	功率（W）	额定电流（A）	额定频率（V）	风量（m^3/min）	风压（kPa）	转速（r/min）	吸入功率（W）
HCX-50	500±15%	220	50	>2.2	14.22	2200	>145
HCX-60	600±15%	220	50	>2.29	15.69	2250	>170
HCX-70	200±15%	220	50	>2.35	17.35	23000	>190
HCX-80	800±15%	220	50	>2.4	17.65	23000	>215
HCX-100	1000±15%	220	50	>3.1	18.73	21500	>280

4）HC 系列单相串励电动机，其技术数据见表 5.12-12。

表 5.12-12　　HC 系列技术数据

型　号	电压(V)	频率(Hz)	电流(A)	输出功率(W)	转速(r/min)	效率(%)	用　途
HCB54/20	220	50	0.6	55	15000	45	150W 食物拌碎器
HCB54/20(1)A	120	60	1.1	55	15000	45	150W 食物拌碎器
HCD54/14	220	50	0.33	30	10000	44	电吹风
HCD54/14A	120	60	0.6	30	10000	44	电吹风
HC76/40	220	50	2.5	250	10000	48	500W 家用碎肉机
HC76/40(1)A	120	60	3.7	200	10000	43	400W 果汁机、打汽机
HC76/30	220	50	1.55	150	12000	46	300W 果汁机
HC76/25A	120	60	3.2	160	12000	45	350W 地板擦光机
HC76/20	220	50	1.3	120	12000	45	250W 果汁机

5）家用电器用单相串励电动机，其技术数据见表 5.12-13。

表 5.12-13　　家电用单相串励电动机技术数据

型　号	额定值		负载					铁心尺寸（mm）	配用家电产品
	电压（V）	频率（Hz）	转矩（$\times10^{-4}$N·m）	转速（r/min）	电流（A）	输入功率（W）	输出功率（W）		
GL5412AF-120	120	60	500	8000	1.07	110	41	φ54×12	中型榨汁机、风筒、咖啡壶等
GH5412A-220	220	50	500	8000	0.56	110	41		
GH5412A-240	240	50	500	7800	0.50	110	40		
GL5415AF-120	120	60	500	8000	0.90	100	41	φ54×15	
GH5415A-220	220	50	500	8000	0.47	100	41		
GH5415A-240	240	50	500	8000	0.45	100	41		
GL5420AF-120	120	60	650	8500	1.25	140	55	φ54×20	暖风机、咖啡壶、搅拌机等
GH5420A-220	220	50	650	8500	0.65	140	55		
GH5420A-240	240	50	650	8500	0.60	140	55		
GL5425AF-120	120	60	600	11500	1.35	140	70.8	φ54×25	
GH5425A-220	220	50	600	11500	0.77	140	70.8		
BL5430A-110	110	50	550	10800	1.13	121	61	φ54×30	小搅拌机、小榨汁机等
BH5430A-220	220	50	550	11000	0.58	122	62		
BL5435N-100	100	50	600	10900	1.42	130	67	φ54×35	
BL5435A-120	120	50	600	7050	0.74	83	43		
BL544N-120	120	60	800	12000	1.6	190	95	φ54×40	
BH5440N-220	220	50	700	12800	0.76	156	92		
HB5440N-240	240	50	700	8500	0.57	127	61		
BH5440A-230	230	50	800	11500	0.75	170	82		
ML7025-120	120	50	1100	10000	1.7	200	113	φ70×25	大搅拌机、大榨汁机等
MH7025-220	220	50	11000	10000	1.12	220	113		

6）HL 系列家用电器用单相串励电动机，其技术数据见表 5.12-14。

表 5.12-14 HL 系列技术数据

型 号	HL-1		HL-1A		HL-2		HL-2A	
铁心厚度	12.5		12.5		15		15	
电压(频率为 50/60Hz)(V)	110(120)		220(240)		120(110)		240(220)	
转 矩(mN·m)	0	30	0	30	0	35	0	35
电 流(A)	0.30	0.75	0.14	0.36	0.32	0.71	0.71	0.41
转 速(r/min)	23500	8237	22800	8213	20000	8612	21600	7143
型 号	HL-3A		HL-3B		HL-3		HL-4A	
铁心厚度	20		20		21		23.5	
电压(频率为 50/60Hz)(V)	110(120)		220(240)		120(110)		240(220)	
转 矩(mN·m)	0	60	0	50	0	50	0	70
电 流(A)	0.29	0.74	0.26	0.66	0.40	1.04	0.31	0.82
转 速(r/min)	28800	12500	26500	12369	24000	11000	28700	12600

型 号	HL-5		HL-5A		HL-5B	
铁心厚度	30		30		30	
电压(频率为 50/60Hz)(V)	110(120)		220(240)		220(240)	
转 矩(mN·m)	0	50	0	50	0	60
电 流(A)	0.25	0.69	0.18	0.42	0.34	0.62
转 速(r/min)	20000	8400	20000	7889	29600	11600

7) JF 系列家用缝纫机用单相串励电动机，其技术数据见表 5.12-15。

表 5.12-15 JF 系列技术数据

型 号	额定功率(W)	额定电压(A)	额定转速(r/min)	额定频率(Hz)	控制器型号
JF6025	60	220	5000	50/60	JFK602
JF6028	60	220	8000	50/60	JFK602
JF8015	80	110	5000	50/60	JFK801
JF8015F	80	110	5000	50/60	JFK801
JF8025	80	220	5000	50/60	JFK802
JF8025F	80	220	5000	50/60	JFK802
JF1027	100	220	7000	50/60	JFK102
JF1027F	100	220	7000	50/60	JFK102
JFB1225	120	220	7000	50/60	JFBK122

8) 吸尘器用单相串励电动机，其技术数据见表 5.12-16～表 5.12-19。

表 5.12-16 HLX 系列技术数据

型 号	功率(W)	电压(A)	频率(Hz)	效率(%)	最大风量(m^3/min)	最大真空度(Pa)
HLX290-23	640	220	50	28	2.2	15000
HLX90-23	760				2.4	16300
HLX90-25	860				2.6	17500
HLX90-30	1080				3.0	18600

表 5.12-17 HX 系列技术数据

型 号	额定输入功率(W)	额定电压(A)	额定频率(Hz)	最大风量(m^3/min)	最大真空度(Pa)	转速(r/min)	风 罩 外径×长度(mm×mm)
HX-54	540±15%	220	50	2.2	14710	23000	135×123
HX-64	640±15%	220	50	2.3	15691	23500	135×123
HX-76	740±15%	220	50	2.5	16671	24000	135×123

表 5.12-18 HWX 系列技术数据

型 号	电 压 (V)	频 率 (Hz)	输入功率 (W)	吸尘功率 (W)	转 速 (r/min)	真空度 (Pa)	风 量 (m^3/min)	吸尘效率 (%)	质 量 (kg)
HWX-60	220	50	640	180	24000	15014	2.2	28	1.5
HWX-60A	120	60	640	180	24000	15014	2.2	28	1.5
HWX-70	220	50	750	210	22000	16514	2.4	28	1.5

表 5. 12-19　　VFT 系列技术数据

型　号	电压(V)	功率(W)	旋转方向(换向器端看)	风量(m^3/min)	真空度(Pa)
VFT3-27	220	270	顺时针	1.5	9800
VFT3-43	220	430	顺时针	2.0	11800
VFT3-54	220	420	顺时针	2.1	14200
VFT3-62	220	620	顺时针	1.8	15680
VFT3-76	220	760	顺时针	2.4	16300
VFT3-86	220	860	顺时针	2.6	17500

第13章 直 线 电 机

1 概述

直线电机主要是直线电动机，它是一种将电能直接转换成直线运动机械能，而不需要任何中间转换机构的传动装置。由于直线电动机具有结构简单、灵活、低噪声、低成本、高速度、高可靠性、耐腐蚀、防潮等优点而得到了越来越多的应用。

1.1 分类

1）按结构型式的分类。直线电机按结构型式主要分为扁平形、圆筒形（或管形）、圆盘形和圆弧形四种。此外，还有一些特殊结构。

2）按功能用途的分类。直线电机，特别是直线感应电动机，按其功能用途主要分为力电机、功电机和能电机。

3）按工作原理的分类。从原理上讲，每种旋转电机都有与之相对应的直线电机。直线电机按其工作原理可分为两个大的方面，即直线电动机和直线驱动器。直线电动机包括直线感应电动机、直线同步电动机、直线直流电动机和直线步进（脉冲）电动机、混合式直线电动机等。直线驱动器包括直线振荡电机、直线电磁螺线管电机、直线电磁泵、直线发电机和非电磁类直线驱动器等。以上这些直线电机又可分成许多不同的种类。图 5.13-1 表示了直线电机按原理的分类。



图 5.13-1 直线电机的原理分类

1.2 功能与特点

1）直线电机以输出推力作为目标时，可称其为力电机。力电机的主要性能指标是指单位输入功率所能产生的推力，或单位体积所能产生的推力，主要用于在静止物体上或低速设备上施加一定推力的直线电机。它以短时运行和低速运行为主。例如，阀门的开闭、门窗的移动、机械手的操作、推车等。这种电机的效率相对旋转电机的低，甚至为零（如对静止物体上施加推力时，效率为零）。因此，对这类电机不能用效率指标去衡量它，而是用推力/功率的比来衡量，即在一定的电磁推力下，其输入的功率越小，则说明其性能越好。

2）直线电机以做功为目标时，称其为功电机。功电机主要作为长期连续运行的直线电机，衡量的指标与旋转电机基本一样，即可用效率、功率因数等指标来衡量其性能的优劣。例如，高速磁悬浮列车用直线电机，各种高速运行的输送线等。

3）直线电机用作高能量的传输变换时，称其为能电机。能电机是指运动构件在短时间所能产生极高能量的驱动电机。它主要是在短时间、短距离内提供巨大的直线运动能。例如，导弹、鱼雷的发射，飞机的起飞以及冲击、碰撞等试验机的驱动等。这类直线电机的主要性能指标是能效率（能效率＝输出的动能/电源所提供的电能）。

直线电机的特点主要表现在以下几个方面：

1）直接驱动，无需转换。采用直线电机驱动的传动装置，不需要任何转换装置而直接产生推力，因此，它可以省去中间转换机构，简化了整个装置或系统，保证了运行的可靠性，传递效率提高，制造成本降低，易于维护。

2）运行无接触，机械损耗低，噪声低。直线电机是通过电能直接产生电磁推力的，它在驱动装置中，可以无机械接触，大大减少了机械损耗。且由于直线电机是靠电磁推力驱动装置运行的，故整个装置或系统噪声很小或无噪声，如直线电机驱动的磁悬浮列车就是如此。

3）直线速度可以很高。直线电机运行时，其零部件和传动装置不像旋转电机那样会受到离心力的作用，因而它的速度可以不受限制。

4）结构简单、灵活，可以组合成各种型式，且可在一些特殊场合中应用。例如，在潮湿甚至水中使用；可在有腐蚀性气体或有毒、有害气体中应用。

5）直线感应电动机的初、次级气隙一般都比旋转电机的气隙大，且由于初级铁心两端开断，因此与同容量的旋转电机相比，功率因数与效率要低些。

1.3 现状与发展

目前，直线电机在世界各国的应用大致可分为五个方面，即物流系统、工业设备、信息与自动化系统、交通与民用、军事及其他。

直线电机驱动的物流系统具有高效率、低噪声、安全可靠、维护方便等优点而获得应用者青睐。目前许多行业，如邮政包裹、烟草、图书等的分拣；电工、电子、机械、化工、医药等的生产流水线和装配线；商场的商品流动线、餐馆的食品流动线、医院的药品、器械的输送以及新颖的立体化仓库的搬运系统和自动化车库都开始采用了直线电机驱动系统。

直线电机在工业设备中的应用，其优点主要体现在系统结构简化、高的精度和加速度等。目前在机床方面的应用比较突出，如数控加工中心、电火花、线切割机床、磨床、锯

床、坐标测量机、冲压机等机床设备上都采用了直线电机驱动技术。直线电机还在一些新的冶金工业设备中得到应用，诸如金属自动浇铸、电磁搅拌、铁磁分离、金属拉伸以及金属加工过程中的输送系统等。此外，直线电机在油田抽油机、矿山设备、起重设备等方面也得到了许多的应用。

直线电机在信息设备方面的应用主要在计算机设备及其输入输出设备方面。在计算机主机上，在硬盘装置方面，采用直线电机后，计算机有效地缩短了存取时间，提高了工作效率。此外，直线电机用于打印机，取得了分辨能力和停止精度提高、加速特性更好的效果。将直线伺服电动机用于驱动数字扫描仪，使扫描仪总重减轻，起动推力提高，图像波动减少，扫描速度提高近 5 倍。至于国内外现有高精度的平面绘图仪，几乎均采用了平面直线步进电动机，它实现了绘图机的高速、高精度、高可靠性及耐久性。直线电机在自动化设备方面的应用有：新型的笔式记录仪、自动绕线机、照相机电磁快门、条形码自动读出器等。

直线电机在交通方面的应用，首推地铁与轻轨车。这种采用直线电机驱动的地铁或轻轨车具有结构简单、低成本、低噪声、转弯半径小、爬坡能力强等优点，目前在日本、美国、加拿大、马来西亚以及中国都已得到了应用。此外，众所周知的直线电机驱动的高速磁浮列车以及电磁推进船也在向着商业化运行的方向发展。

直线电机在民用方面的发展较为迅速，产品较为成熟，应用面广。目前已应用的有直线电机驱动门，直线电机驱动窗和窗帘，直线电机驱动的床、柜、桌、椅、盘形直线电机驱动的洗衣机，空调、冰箱用直线电机压缩机，用直线电机驱动的家用针织机和缝纫机、炒茶机等。特别是用直线电机驱动的电梯，它所具有结构简单、省材、省空间、高速、低噪声、节能的优点，已引起电梯界的极大关注。此外，一种可同时沿垂直、水平、曲线线路和有分支线路运行的直线同步电机运输系统也引起了人们的注意。

直线电机在军事上也得到了一些应用，如前面所述的直线电机驱动的潜艇，还有直线电机驱动的电磁炮，航母的飞机弹射以及军用靶场、军用仿真系统采用直线电机驱动等。

此外，直线电机还用于天文观测系统中驱动摆镜和反观镜；直线电机驱动人工心脏；直线电机驱动的盲人触觉模拟器；直线电机在医院设备、电动工具、玩具以及建筑用打桩机等方面得到应用。

直线电机的发展，据有关文献最早可追溯到 1840 年惠斯登（Wheatstone）开始提出和制作了略具雏形但并不成功的直线电机，从那时至今，世界直线电机技术经历了探索实验、开发应用和实用商品化三个阶段。我国直线电机的研究和应用从 20 世纪 70 年代初开始，1984 年成立了直线电机专业委员会，目前，直线电机专业委员会挂靠在浙江大学电气学院。直线电机的研发主要集中在大学和研究单位为主，现已完成了百项以上的技术成果和产品。目前，已有专业生产直线电机的企业。我国直线电机研究虽然也取得了一些成绩，但与国外相比，其推广应用方面尚存在很大差距。

直线电机技术的发展，经历了不短的历史和几起几落的波浪式发展，采用直线电机驱动的新型装置与非直线电机驱动相比，它所具有的结构简单、无接触、无磨损、噪声低、速度快、精度高、组合灵活等优点是明显的，但由于直线电机本身所具有的磁路开断所引起的边端效应以及安装气隙较大等问题，故在一些直线运动的装置或系统中，是否采用新型的直线电机来驱动，要权衡利弊得失，选择能充分发挥直线电机自身优势的直线运动装置或系统中发展应用。在一些旋转电机或其他驱动装置无能为力或勉强应付的地方，寻找直线电机能充分发挥优势的位置，在满足人类需求和完善人类美好愿望的进程中求得自身的发展，前景是广阔的，但选择是要谨慎的。

2　基本结构、工作原理与选用原则

2.1　基本结构

图 5.13-2 分别表示了一台旋转电机和一台扁平型直线电机。

直线电机可以认为是旋转电机在结构方面的一种演变。它可看作是将一台旋转电机沿径向剖开，然后将电机的圆周展成直线，如图 5.13-2 和图 5.13-3 所示。图 5.13-3 为感应式直线电机的演变过程。图 5.13-4 为永磁式直线电机的演变过程。这样就得到了由旋转电机演变而来的最原始的直线电机。由定子演变而来的一侧称为初级或原边，由转子演变而来的一侧称为次级或副边。图 5.13-3 中的直线电机，其初级和次级长度是相等的。由于在运行时初级与次级之间要相对运动，为了保证在所需的行程范围内，初级与次级之间的耦合保持不变，实际应用时，是将初级与次级制造成不同

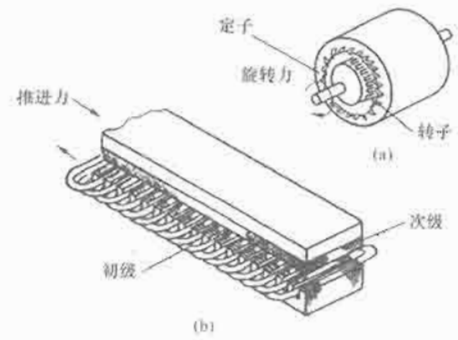


图 5.13-2　旋转电机和直线电机示意图
（a）旋转电动机；（b）直线电动机

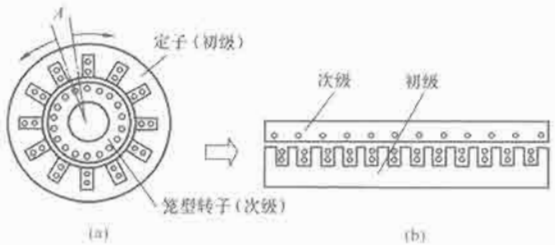


图 5.13-3　由感应式旋转电机演变为直线电机的过程
（a）沿径向剖开；（b）把圆周展成直线

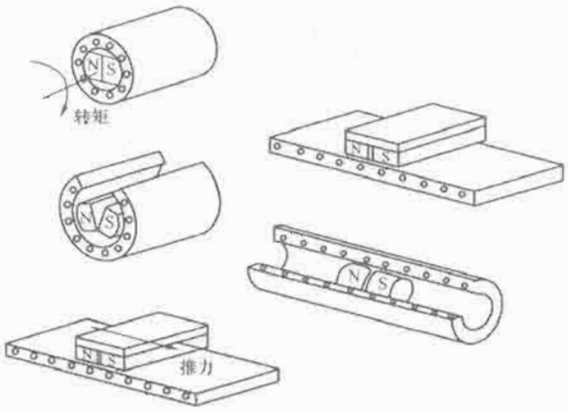


图 5.13-4　由永磁旋转电机演变为直线电机的过程

的长度。既可以是初级短、次级长，也可以是初级长、次级短，前者称作短初级长次级，后者称为长初级短次级。由于短初级在制造成本和运行费用上均比短次级低得多，因此，目前除特殊场合外，一般均采用短初级。图 5.13-5 所示的直线电机仅在一边安放初级，称为单边形直线电机。它的一个最大特点是在初级与次级之间存在着一个很大的法向吸力，这个法向吸力有时可达额定轴向推力的 10 倍以上。在大多数的场合下，这种法向吸力是不希望存在的，如果在次级的两边都装上初级，那么这个法向吸力可以相互抵消。这种结构型式称为双边形，如图 5.13-6 所示。

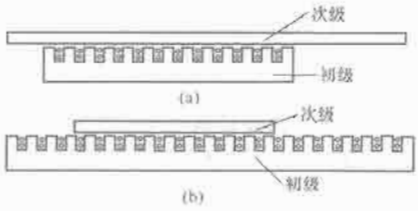


图 5.13-5 单边形直线电机
(a) 短初级；(b) 短次级

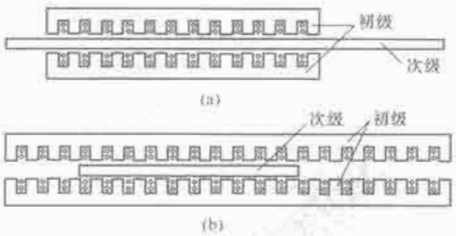


图 5.13-6 双边形直线电机
(a) 短初级；(b) 短次级

上述直线电机称为扁平形直线电机，目前应用最广泛。直线电机还可以做成圆筒形（也称管形）结构。它也可以看作是由旋转电机演变过来的。其演变的过程如图 5.13-7 所示。图 5.13-7 (a) 表示一台旋转式电机以及定子绕组所构成的磁场极性分布情况。将扁平形直线电机沿着和直线运动相垂直的方向卷接成筒形，就构成如图 5.13-7 (c) 所示的圆筒形直线电机。

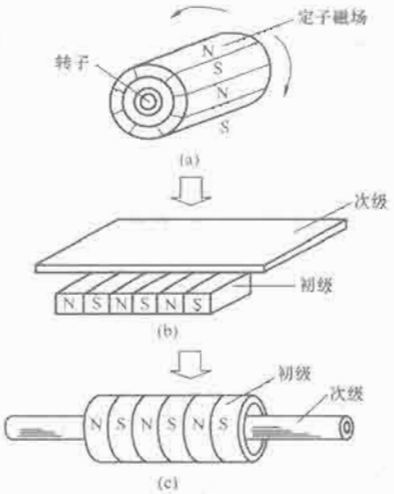


图 5.13-7 旋转电机演变为圆筒形直线电机的过程
(a) 旋转电机；(b) 扁单边形直线电机；(c) 圆筒形直线电机

此外，直线电机还有弧形和盘形结构。所谓弧形结构，就是将平板形直线电机的初级沿运动方向改成弧形，并安放于圆柱形次级的柱面外侧，如图 5.13-8 所示。图 5.13-9 是圆盘形直线电机。该电机把次级做成一片圆盘（铜或铝，或铜、铝与铁复合），将初级放在次级圆盘靠近外缘的平面上。盘形直线电机的初级可以是双面的，也可以是单面的。弧形和盘形直线电机的运动实际上是一个圆周运动，如图中的箭头所示，然而由于它们的运行原理和设计方法与扁平形直线电机结构相似，故仍归入直线电机的范畴。



图 5.13-8 弧形直线电动机

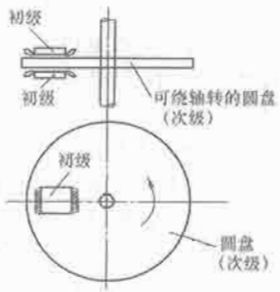


图 5.13-9 圆盘形直线电机

2.2 工作原理

直线电机的工作原理与旋转电机的相似。遵循电机学的基本原理，本节将以直线感应电动机为例，从旋转电机的基本工作原理出发，引伸出直线电机的基本工作原理。

将旋转电机沿径向剖开，并将圆周拉直，便成了如图 5.13-10 所示的直线电机。在这台直线电机的三相绕组中通入三相对称正弦电流后，也会产生气隙磁场。当不考虑由于铁心两端开断而引起的纵向边端效应时，这个气隙磁场的分布情况与旋转电机相似，即可看成沿展开的直线方向呈正弦形分布。当三相电流随时间变化时，气隙磁场将按 A、B、C 相序沿直线移动。这个原理与旋转电机相似，两者的差异是：这个磁场是平移的，而不是旋转的，因此称为行波磁场。显然，行波磁场的移动速度与旋转磁场在定子内圆表面上的线速度是一样的，即为 v_s(m/s)，称为同步速度，且

$$v_s = 2f\tau$$

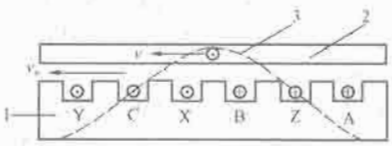


图 5.13-10 直线电机的基本工作原理
1—初级；2—次级；3—行波磁场

再来看行波磁场对次级的作用。假定次级为栅形次级，图 5.13-10 中仅画出其中的导条。次级导条在行波磁场切割下，将感应电动势并产生电流，而所有导条的电流和气隙磁场相互作用便产生电磁推力。在这个电磁推力的作用下，如果初级是固定不动的，那么次级就顺着行波磁场运动的方向作直线运动。若次级移动的速度用 v 表示，移动的差率（简称移差率）用 s 表示，则有

$$s = \frac{v_s - v}{v_s}$$

$$v_s - v = sv_s$$

$$v = (1-s)v_s$$

在电动机运行状态下，s 在 0 与 1 之间。

应该指出，直线电机的次级大多采用整块金属板或复合金属板，因此并不存在明显的导条。但在分析时，不妨把整块金属板或复合金属板看成是无限多的导条并列安置，这样仍可以应用上述原理进行讨论。在图 5.13-11 中，分别画出了假想导条中的感应电流及金属板内电流的分布。图中 l_h 为初级铁心的叠片厚度，c 为次级在 l_h 长度方向伸出初级铁心的宽度，用来作为次级感应电流的端部通路，c 的大小将影响次级的电阻。

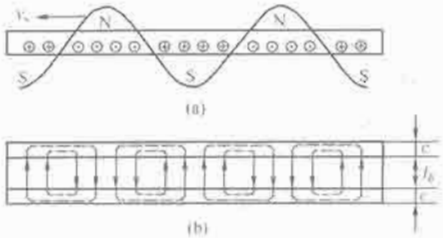


图 5.13-11　次级导体板中的电流

(a) 假想导条中的感应电流；(b) 金属板内电流分布

旋转电机通过对换任意两相的电源线，可以实现反向旋转。这是因为三相绕组的相序反了，旋转磁场的转向也随之反向。同样，直线电机对换任意两相的电源线后，运动方向也会反过来。根据这一原理，可使直线电机做往复直线运动。

2.3　应用基础与选用原则

2.3.1　应用基础

直线电机的应用基础一般包括以下几个方面：

1）对所用直线电机的基本特性、应用条件、优缺点有一定的了解。

2）对一种全新的设备或产品，若采用直线电机，与采用其他驱动方式相比，应具有明显优势。

3）对设备或产品进行改造时，若应用直线电机来替代原有的驱动件，则必须使采用直线电机后的设备或产品在总体上具有优势，或在某些方面采用其他驱动件无法达到，而采用直线电机才能达到。

4）需要研制某些设备或产品，这些设备或产品目前在性能或外形上若采用其他驱动方式均无法达到时。

2.3.2　需注意的问题与选用原则

(1) 评价标准

我们常常要对一些设备进行“性能好坏”的评价，然而“性能好坏”实际上在不同的使用场合、使用目的、使用要求，其评价会有不同的结论。对一台普通旋转电机，常用效率、功率因数等作为评价“性能好坏”的指标。但对于直线电机，特别是力电机，有它自己的衡量指标，这就是由莱斯韦特提出的品质因数。它对衡量直线电机的品质是一个方便的方法，有若干种方法来定义品质因数 G。例如，对直线感应电动机有

$$G=\frac{2f\mu_0\sigma\tau^2}{\pi g}$$

式中，μ_0 为磁导率；σ 为电阻率；τ 为电机极距；g 为电机初、次级之间的气隙。

根据等效电路，确定次级的品质因数为

$$G=\frac{X_m}{R_2}$$

式中，X_m 为励磁电抗；R_2 为次级电阻。关于品质因数 G 的详细说明，见参考文献。

初步设计直线电机时，品质因数是一个有用的指标。然而对高速直线感应电动机来说，品质因数大，不一定能得到最大推力和效率。在这种情况下，必须对莱斯韦特品质因数做一些修正。具体可参见有关文献。

(2) 工作持续率

直线电机特别是直线感应电动机，一般应用在断续或短时运行的场合较多，选择应用直线电机时，必须考虑它的运行工作状态，特别是工作持续率，它将使所选用电机的外形和重量发生变化。同样尺寸和重量的直线电机在不同场合下，其输出推力是不一样的。

(3) 边端效应

直线电机由于磁路开断，存在着边端效应。

边端效应 ⟨ 纵向端部效应 ⟨ 静态 / 动态 ; 横向边缘效应

边端效应简略分析如下：

1）静态纵向端部效应。直线电机与旋转电机有所不同，前者的铁心不像后者那样具有闭合圆环的形状，而是长直的、两端开断的铁心。由于铁心及安置在其槽中的绕组在两端不连续，所以各相之间的互感不相等，即使在初级绕组中供给三相对称的交流电压，在各相绕组中也将产生不对称的电流。利用对称分量法可以把它们分解成顺序、逆序和零序电流。对应这三种电流将有三类磁场，即顺序正向行波磁场、逆序反向行波磁场和零序脉振磁场。后两类磁场在次级运行过程中将产生阻力和增加附加损耗。即使采取一些附加措施，使三相电流对称，而直线电机由于铁心开断仍然会产生相对于初级不移动的脉振磁场。上述由于铁心开断所引起的各相绕组互感不相等以及脉振磁场和反向磁场存在的现象，称为直线感应电动机的静态纵向边端效应。

2）动态纵向端部效应。由于铁心开断而在气隙中出现脉振磁场和反向行波磁场的效应，不论是否考虑次级的反作用，都是存在的，除了这种静态纵向边端效应以外，当次级运动时，还存在另一种纵向边端效应，称为动态纵向边端效应。为了说明动态纵向边端效应，假定气隙只存在正向行波磁场，且次级跟着行波磁场同步运行，此时次级相对于行波磁场没有切割。按理次级上没有感应电流，但实际上次级板上能感应出纵向边端效应电流和损耗，现分析如下：

根据相对运动的原理，假定次级以同步速度相对于静止的初级移动，如图 5.13-12 所示。当时间为 t_0、t_1、t_2、t_3 和 t_4 时，次级导体上电路 C 的相应位置是 C_0、C_1、C_2、C_3 和 C_4。因为次级是以同步速度移动，所以当 C 在 C_2、C_0 和 C_4 位置时，电路中没有感应电动势，因为没有变化的磁通

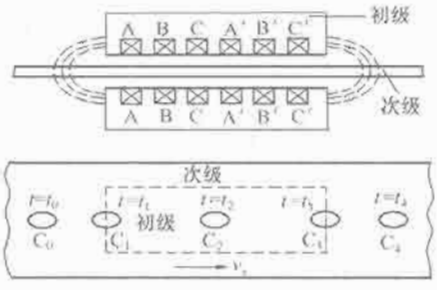


图 5.13-12　直线感应电动机的纵向边端效应

和它交链。但当C在C_1和C_3位置时，在电路C中就有感应电动势和电流产生，因为铁心开断端在C进入C_1和离开C_3位置时，磁导发生了变化。这种感生电流称为动态纵向边端效应电流，它会产生附加损耗和附加力。

3）横向边缘效应。直线感应电动机初级和次级的宽度都是有限的（通常次级比初级宽一些，见图5.13-13），在有限宽的情况下，次级电流以及次级板对气隙磁场均会产生影响，从而影响直线电机的性能和指标，把这种影响称为直线电机的横向边缘效应。图5.13-14表示了次级感应电流的路径。

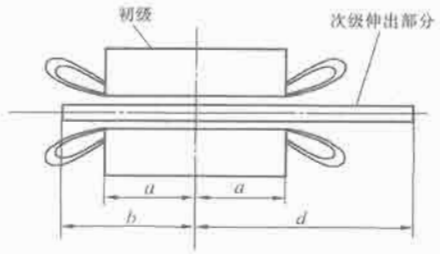


图5.13-13 表示次级伸出的双边直线感应电动机的横截面图

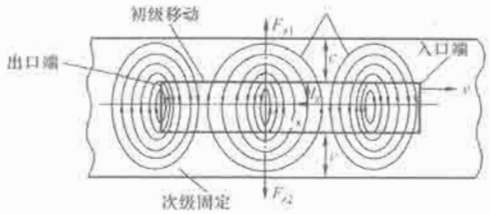


图5.13-14 次级感应电流路径

直线电机边端效应的分析与计算参见有关文献。

在选用或设计直线电机时，一般原则是：

1）在低速直线电机中，希望品质因数G大些。

2）在短时运行的工况下，直线电机的电密、磁通密度可取大些，电机体积可小些。

3）在考虑边端效应的影响时，电机的极数尽量取多些（一般大于6）。

4）平板电机次级宽度大于初级铁心宽度。

5）多台电机则采用相位互换方法。

3 设计要点

3.1 设计准则

直线电机具有独特的结构特点，不能照搬旋转电机的设计准则。不同的直线电机有不同的设计准则，如直线感应电机是以品质因数G作为设计准则的。品质因数G是直线感应电机初步设计中一个非常有用的指标。

对于低速高转差的电机，应根据使单位输入功率产生最大推力来选择最合适的G值，一般$G\geqslant 1$。对于连续运行的低转差电机，应根据使运行的机械效率或电磁效率达到最大值来选择适当的G值，通常$G\gg 1$。对于高速直线感应电动机，当品质因数G增大时，性能参数也随着有所改进，同时边缘效应性能参数就越趋向于占据统治地位。因此，G并不是越大越好。最佳品质因数G_0就定义为直线感应电动机在同步转速下所产生的推力为零时所具有的性能指标。

对于直线同步电动机、直线直流电动机、直线步进电动机及其他直线电动机的设计准则与直线感应电机有所不同，与旋转电机类似。

3.2 设计要点

1）等效电路的计算。等效电路的计算必须考虑边端效应的影响，具体参见有关文献。

2）关于不同工作持续率的设计。同样尺寸和重量的直线电机在不同的工作持续率下，其输出推力的设计是不一样的。一般工作持续率越高，电流密度与磁通密度就取得相对低，相对工作持续率低的直线电机而言，工作持续率高的直线电机的尺寸就要大一些，重量就要重一些。

3）不同次级材料与结构的设计。不同次级材料与结构的设计会给直线电机的运行带来很大影响。

4）参数变化的影响。直线感应电动机的设计包含许多影响电机性能的可变参数，其一般规律见表5.13-1。

表5.13-1 参数变化的影响

参 数	增 大	减 小
气隙g	励磁电流大；离开端损耗大	品质因数高；输出力大；效率高
极距τ	品质因数高；速度快	增加极数
极数$2p$	端部效应小	次级漏抗大
次级厚度	品质因数高；起动电流大	次级漏抗大
次级电阻率	端部效应小	品质因数高；次级损耗小
初级齿宽	漏抗大	推力大；效率高

3.3 优化设计

由于直线电机分析的数学模型复杂，函数形态差，某些设计变量又有一定的离散要求，因此，直线电机的优化设计是一个混合性的优化问题。电机优化的核心问题是优化方法的选择。在直线电机优化设计方法中，有的采用局部最优化方法，有的采用全局最优化方法，以及局部与全局相结合的方法等。如虎克-杰夫斯法、遗传算法、模拟退火法、遗传算法与模拟退火法的结合法以及其他优化方法。然而，对于直线电机设计来说，更重要的是要利用多维的电磁场分析工具与电机优化设计相结合。

4 工艺特点

直线电机的大部分工艺与旋转电机相类似。例如，应用最多的平板形直线电机初级的主要工艺流程如图5.13-15所示。

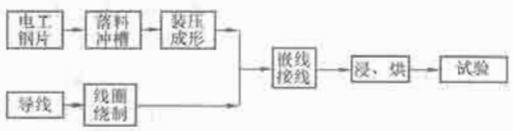


图5.13-15 平板形直线电机主要工艺流程

直线电机也有一些本身的工艺特点，例如：

1）直线电机的初、次级不像旋转电机的定、转子总是独立地做在一起的，它往往与驱动对象合为一体，其初、次级往往成了驱动对象的一部分，因此，其加工工艺需要与驱动对象一起考虑。

2）直线电机初级，特别是平板型直线电机初级常用环氧树脂进行封装，以达到提高绝缘性能、防潮、耐腐、防盐雾以及整体性好等功能。

3）直线电机的次级往往暴露在外面，因此，在制造过程中要考虑表面防护措施的特种工艺。

4）直线电机对机械加工中的平直度要求、圆筒形直线电机的圆度以及表面粗糙度等都要求较高，在制造过程中需有专门措施加以保证。

5）直线电机在一些专门的应用场合，往往有一些专门的制造工艺。例如，磁浮列车用的长定子直线电机初级铁心通过一系列的浸烘与专用黏结剂做成了一个无任何螺栓连接的整体铁心，再经过环氧树脂封装达到了2）的要求。

5 测试方法和相关技术标准

我国在1995年有一个部颁的JB/T 7823—1995《三相直线异步电动机》标准，也有一些研究单位和企业制定了企业标准。2005年，我国又对1995年的JB/T 7823—1995《三相直线异步电动机》标准进行了重新制定，其标准改名为《三相扁平型直线异步电动机》。该标准与JB/T 7823—1995相比，主要变化如下：

1）修改了原标准名称。

2）增加了新的定义和术语，如“移差率”、“堵动推力”、“堵动电流”等。

3）修改了直线电机的型号组成。

4）增加了水冷的冷却方式。

5）取消了直线电机的尺寸及公差要求。

该标准的主要内容介绍如下：

标准规定了三相扁平形直线电机的型式、基本参数、技术要求、试验方法、检测规则及标志、包装、运输和储存的要求。

（1）术语和定义

1）移差率。直线电机同步速度与次级速度之差，以标么值或同步速度的百分比表示。

2）堵动推力。直线电机在额定频率、额定电压、额定气隙下，移差率 $s=1$，即堵动状态下的推力。

3）堵动电流。直线电机在额定频率、额定电压、额定气隙下，初次级相对位置堵住时，从供电线路输入的最大稳态方均根电流。

4）额定气隙。直线电机在额定频率、额定电压下，初级与次级间的气隙调整到保持额定运行状态时的气隙值。

（2）型号及基本参数

1）型号表示方法。参照GB/T 4831，直线异步电动机的名称代号用“XY”表示，X表示直线型，Y表示异步。直线电机的型号由名称代号、规格代号及初级结构尺寸组成，如图5.13-16所示。

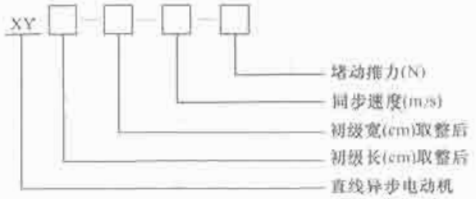


图5.13-16 直线电机的型号组成

例 XY74-15-4.5-300表示堵动推力为300N、同步速度为4.5m/s、初级长取整后为740mm，初级宽取整后为150mm的扁平型三相直线异步电动机。

2）工作方式。直线电机冷却方式可分为自然冷却、强迫风冷和水冷。

直线电机的工作制的定额有连续（S1）工作制，短时（S2）工作制，断续周期（S3）工作制（负载持续率为15%、25%、40%、60%）。用户特殊要求，可按协议制造。

3）基本参数。直线电机额定频率为50Hz，额定电压为380V。用户特殊要求，可按协议制造。

直线电机按下列堵动推力（N）（移差率为1时）制造：10，20，30，50，100，200，300，500，750，1000，1500，2000，2500，3000，4000，5000，6000，8000。用户特殊需求，可按协议制造。

直线电机按下列同步速度制造：3m/s、4.5m/s、6m/s、9m/s、12m/s。用户特殊需求，可按协议制造。

直线电机的初级绕组接线一般为Y联结，用户特殊需求，可按协议。

（3）技术要求

该标准对直线电机提出了如下一些技术要求：

1）环境空气的温度和湿度要求。

2）电源电压和频率与额定值的偏差规定。

3）直线电机推力的容许误差。

4）直线电机在不同次级结构下的功率因数保证值。

5）直线电机的绝缘等级及应能承受的耐压值。

6）直线电机三相电流的允许不平衡值。

7）直线电机的表面要求及接线盒要求等。

（4）试验方法

在该标准中，根据国家有关标准并结合直线电机的特点提出和规定了直线电机在推力、电压特性、气隙特性以及温升方面的试验方法，具体可见参考文献。

（5）检验规则

在该标准中，对直线电机的出厂试验和型式试验的内容和要求，做出了明确的规定。

6 驱动与控制

6.1 非伺服驱动控制系统

对非伺服驱动控制，基本可沿用旋转电机的驱动控制技术，但必须注意以下几点：

1）控制的数学模型必须考虑边端效应的影响。

2）必须考虑大气隙对电机运行性能的影响。

3）必须考虑机械结构对电机运行性能的影响。

4）必须考虑次级材料变化对电机运行性能的影响。

5）必须考虑瞬态过程对电机运行性能的影响。

6.2 伺服驱动控制系统

6.2.1 直线伺服电动机

直线伺服电动机分为直线直流伺服电动机与交流直线伺服电动机。20世纪90年代以前，直线伺服电动机以直线直流伺服电动机为主，90年代以后，交流直线伺服电动机成为主导。

交流直线伺服电动机又分为感应式交流直线伺服电动机和永磁式交流直线伺服电动机。永磁式交流直线伺服电动机具有推力强度高、损耗低、时间常数小、响应快、控制比较容易等一系列特点。主要缺点是永磁体的高成本带来整体装置的高价格，以及在端部存在严重的漏磁场。表5.13-2为两类直线伺服电动机的性能对比。

表5.13-2 两类直线伺服电动机的性能对比

电动机类型	永磁式	感应式
单位面积电磁推力	大	小
效 率	高	低

续表

电动机类型	永磁式	感应式
磁极位置传感器	要	不要
可控性	好	较差
进给平稳性	好	较好
动力制动	可能	尚无
对气隙调整的要求	低	高
尘埃防护	难	易
磁吸力	常量	变量
安装时的磁吸力	大	无

由表可见，在总体性能上永磁式交流直线伺服电动机具有较大的优势，但从目前来看，由于感应式交流直线伺服电动机的成本较低，防尘与安装均较容易，且性能已接近于永磁式交流直线伺服电动机的水平，所以其应用也是广泛的。

6.2.2 直线伺服电动机的控制

目前，直线电机伺服系统以交流为主，这里就介绍交流直线伺服电动机的控制。

在高精度微进给的数控机床伺服驱动系统以及一些高精密的自动化设备当中，对交流直线伺服电动机的控制要求很高，有时必须既是高速又是高精度的，而这两项要求往往是不易同时得到满足的。但为了尽量满足和达到这些要求，交流直线伺服系统必须充分考虑各种因素对系统性能的影响，诸如系统的非线性、耦合性、动子质量和粘滞摩擦系数以及电阻电感的变化、负载扰动、电源的波动、电流时滞谐波、永磁体充磁的不均匀性、动子磁链分布的非正弦性、动子槽内磁阻的变化、环境温度和湿度的变化、摩擦的非线性、低速时爬行，特别是端部效应引起的推力变化等。一个交流直线伺服系统必须是针对具体对象的特点，在满足主要要求的同时，兼顾跟踪能力和抗扰能力。交流直线伺服电动机的控制方法大致归纳为如下几种：

（1）传统控制方法

传统的控制方法如 PID 反馈控制、解耦控制等，在交流伺服系统中得到了广泛的应用。其中 PID 控制算法蕴涵了动态控制过程中的过去、现在和将来的信息，而且其配置几乎为最优，有较强鲁棒性，是交流伺服电动机驱动系统中最基本的控制型式，其应用广泛，并与其他新型控制思想结合，形成了许多有价值的控制方法。如在交流伺服电动机中实现矢量控制。

（2）现代控制方法

在对象模型确定、不变化且为线性，以及操作条件、运行环境确定不变的条件下，采取传统控制方法是简单有效的。但在高精度微进给的高性能场合，就必须考虑对象的结构与参数变化、各种非线性的影响、运行环境的改变以及环境干扰等时变和不确定因素，这样才能得到满意的控制效果。因此现代控制方法在直线伺服电动机控制的研究中引起了很大的重视。例如，对于直线伺服电动机特性参数的缓慢变化这一类扰动及其他外界干扰对系统伺服性能的影响，可以采用自适应控制方法加以降低或消除。对需快速响应、使目标值与被控对象对参数及扰动变化不敏感、不希望在线辨识的系统可采用变结构控制。针对控制对象模型的不确定性，要对抑制扰动具有良好的效果，可采用鲁棒控制。对目标值的过去、现在、未来和干扰信号的未来情况完全知道的情况下，要使目标值与被控量间的偏差整体达到最小，则可采用预见控制等

（3）智能控制方法

对控制对象、环境与任务复杂的系统，宜采用智能控制方法。它包括模糊逻辑控制、神经网络控制和专家控制。其中模糊控制器专用芯片已商品化，因其实时性好、控制精度高，在伺服系统中已有应用。神经网络从理论上讲具有很强的信息综合能力，在计算速度能够保证的情况下，可以解决任意复杂的控制问题。但目前缺乏相应的神经网络计算机的硬件支持，其在直线伺服中的应用有待于神经网络集成电路芯片生产的成熟。专家控制一般用于复杂的过程控制中，在伺服系统中的研究较少。预计在不远的将来，智能控制方法必将成为交流直线伺服系统中重要的控制方法之一。

在交流直线伺服电动机的控制研究中，还包括对直线伺服电动机的齿槽效应的控制、各种扰动的控制、无位置传感器的研究等。利用直线电机伺服系统可以达到小于 0.01μm/min 或高达 300m/min 的速度。直线电机伺服系统可以保证恒定的速度特性，速度偏差优于±0.01%。在需要较高加速度的应用中，较小的直线电机可以方便地提供大于 10g 的加速度，采用前馈控制的直线电机系统可以减少跟踪误差百倍以上。

然而，直线电机伺服系统在应用中也存在着不少需要不断解决的问题，例如，由于直线电机伺服系统由直线电动机直接驱动被控对象，系统没有任何中间的缓冲过程，参数摄动、负载扰动等不确定因素的影响将直接反映到直线电机的运动控制中，因而，增加了控制上的困难。还有诸如强制冷却系统、制动系统以及所谓的隔磁问题、边端效应问题等。

7 直线感应电动机及其应用

7.1 直线感应电动机的原理、结构与特性

7.1.1 直线感应电动机的原理与结构分类

直线感应电动机的基本原理与旋转式感应电动机相类似。与旋转电机一样，直线感应电动机也可以分为三相、两相或单相。单相直线感应电动机的起动与普通单相旋转感应电动机一样，它也可以作成遮极式或带电容辅助起动。图 5.13-17 是按结构观点对直线感应电动机进行的分类。图 5.13-18～图 5.13-24 是部分直线感应电动机的外形图。图 5.13-25～图 5.13-28 是横向磁通分布结构的直线感应电动机。

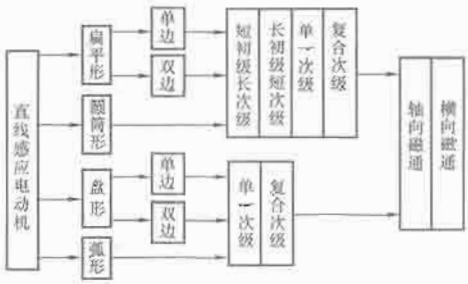


图 5.13-17 直线感应电动机的分类



图 5.13-18 单边形直线感应电动机初级照片

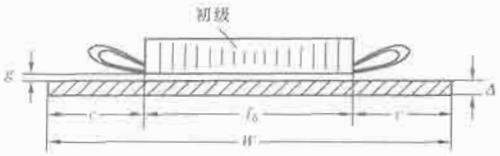


图 5.13-19 单边形直线电动机断面图

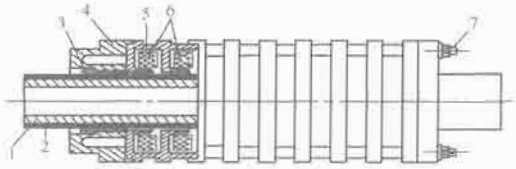


图 5.13-20 圆筒形直线电动机的一种结构
1—厚壁铁管；2—铜皮或铝皮；3—滑动轴承；4—端盖；5—圆环铁心；6—饼式绕组；7—螺栓

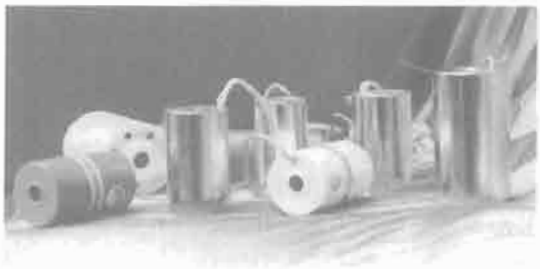


图 5.13-21 圆筒形直线感应电动机的外形照片

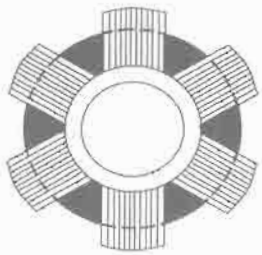


图 5.13-22 叠片初级圆筒形直线电动机

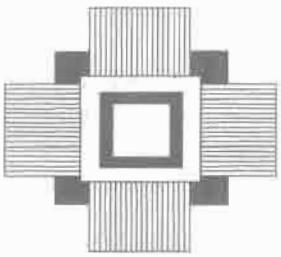


图 5.13-23 四方形初级筒形直线电动机

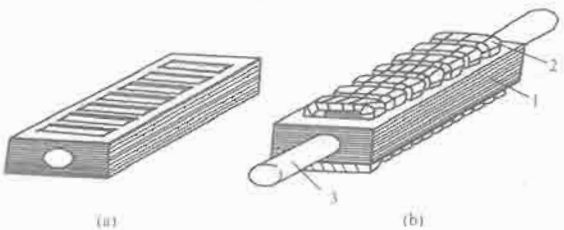


图 5.13-24 窗式初级圆筒形直线电动机
(a) 初级铁心；(b) 总体结构
1—初级铁心；2—初级绕组；3—次级

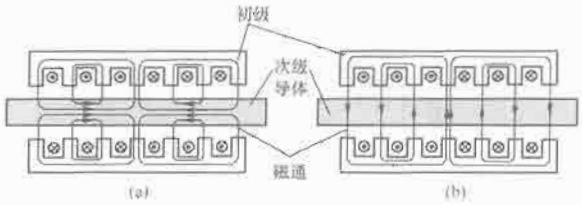


图 5.13-25 双边形直线电动机根据磁通通过方式的分类
(a) 轴向磁通式；(b) 横向磁通式

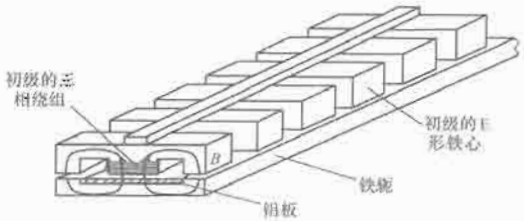


图 5.13-26 单边形横向磁通式直线感应电动机

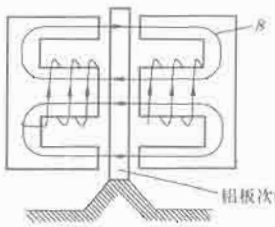


图 5.13-27 双边形横向磁通式直线感应电动机

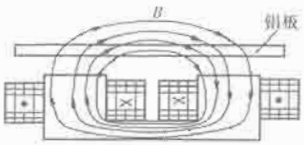


图 5.13-28 自悬浮横向磁通式直线感应电动机

7.1.2 直线感应电动机的基本特性

(1) 推力—速度特性

图 5.13-29 表示了直线感应电动机与旋转感应电动机的推力—速度特性对比。图中，旋转感应电动机转矩的最大值发生在较低的移差率处，即 $s=0.2$ 附近。直线感应电动机的最大推力在高移差率处，即 $s=1$ 附近。由此可知，直线感应电动机的起动推力大，在高速区域推力小，它的推力—速度特性近似成一条直线，如图 5.13-30 所示，具有较好的控制品质。它的推力公式可由下式求得

$$F=(F_{st}-F_0)\left(1-\frac{v}{v_l}\right)$$

式中，F_{st} 为起动推力，N；F_0 为摩擦力，N；v_l 为空载速度（克服摩擦力后所能达到的最高速度），m/s。

(2) 推力（电流）—气隙长度特性

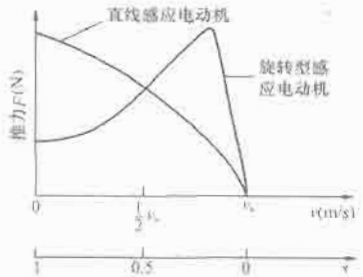


图 5.13-29 直线感应电动机与旋转感应电动机的推力—速度特性的比较

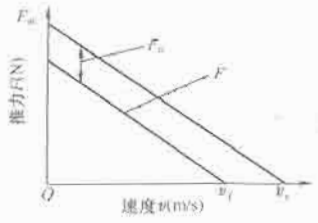


图 5.13-30 近似直线的推力—速度特性
F_{st}—起动推力；v_s—同步速度；
F_0—摩擦力；v_1—空载速度

图 5.13-31 表示了直线感应电动机的推力 F_{st} 随气隙长度 δ 改变而变化的依赖关系。通常，直线感应电动机的气隙长度比旋转电机的大，因此，其功率因数和效率要低一些。当气隙小时，其特性就会得到改善。图 5.13-32 表示了电流随气隙长度的增大而增大的线性关系。

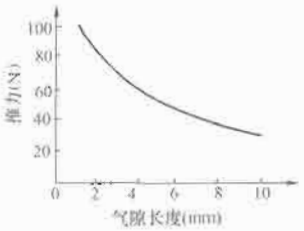


图 5.13-31 推力—气隙特性

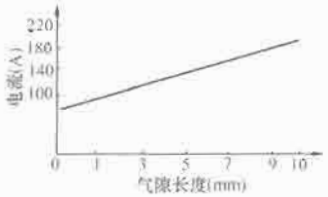


图 5.13-32 电流—气隙特性

(3) 推力—负荷因数 (Duty Factor，DF) 特性

图 5.13-34 表示了推力—负荷因数特性，有时也称推力—持续率特性，负荷因数的决定方法如图 5.13-33 所示，其值由下式得出

$$DF=\frac{T_1+T_2}{T}\times 100\%$$

式中，T 为 1 个周期的时间，s；T_1+T_2 为整个通电时间，s。

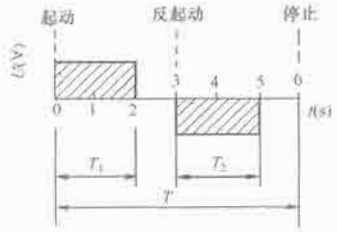


图 5.13-33 负荷因数的决定方法

(4) 推力—线电压特性、推力—输入功率特性

图 5.13-35 表示推力随线电压的增加而增大的特性，图 5.13-36 表示推力随输入功率的增加而增大的特性。

7.1.3 直线感应电动机的等效电路

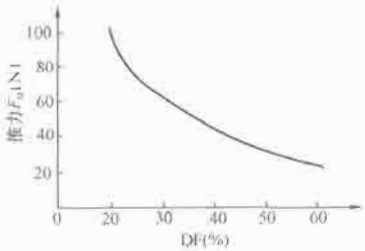


图 5.13-34 推力—负荷因数特性

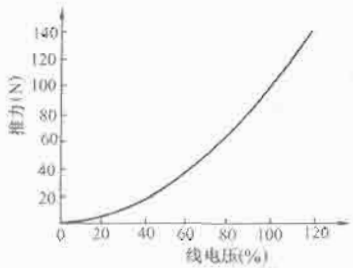


图 5.13-35 推力—线电压特性

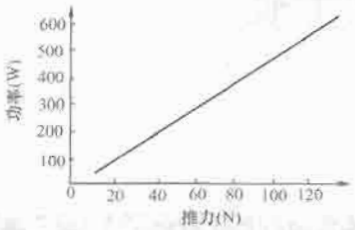


图 5.13-36 推力—输入功率特性

直线感应电动机的稳态特性近似计算方法，基本可以沿用旋转感应电动机的等效电路。但直线感应电动机的气隙长度可达一般感应电动机的 10～20 倍，励磁电流极大，当然 L 形等效电路是不能适用的，只有采用 T 形等效电路。

就直线感应电动机初级电路的不平衡而言，随着极数的增加不平衡程度在减少，极数在 6 极以上可以忽视这一因素。因此，采用以往 T 形等效电路计算直线感应电动机的特性时，所产生的误差可以看作仅仅是边端效应损耗。如能将边端损耗作为电路因素引入等效电路中，那么就能得出直线感应电动机的等效电路，图 5.13-37 为考虑了边端效应的直线感应电动机等效电路图，具体计算与推导参见文献。

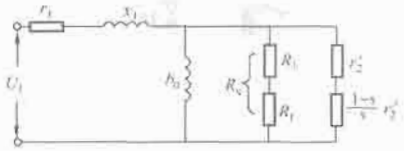


图 5.13-37 计入边端效应的直线感应电动机等效电路
b_0—励磁电纳，Ω；r_1—初级绕组电阻，Ω；
x_1—初级绕组漏电抗，Ω；r_2'—次级导体电阻初级换算值，Ω；R_1、R_2—考虑了边端效应的等效电阻

7.1.4 直线感应电动机的次级及其影响

直线感应电动机不同的次级（包括不同的材料、不同的结构）将对直线感应电动机的性能产生很大的影响。不管是扁平形、圆筒形、盘形还是弧形直线感应电动机，虽然它们的次级型式各种各样，但从材料角度来看，可把它们分成两大类，即一类为单一材料次级，另一类为复合材料次级。次级影响直线电机性能的主要因素在其材料的导电和导磁性能上。在讨论次级对直线电机影响的问题时，先就次级导体中磁通的渗透深度 δ 进行讨论，然后再对不同材料与结构的次级对直线电机的影响进行论述。

(1) 渗透深度

把磁通能够透入次级导体内部的深度用渗透深度 δ_T 来表示，δ_T 可以由下式给出

$$\delta_T = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0\mu_s\pi f}}$$

式中，ρ为金属材料的电阻率；μ_s为金属材料的相对磁导率，它们的值见表5.13-3。

表5.13-3 金属材料的电阻率和磁导率

金属材料	ρ（Ω·m）	μ_s
铜	1.69×10^{-8}	1
铝	2.69×10^{-8}	1
黄铜	5×10^{-8}	1
铁	10×10^{-8}	10～100

利用上式和表5.13-3，在频率$f=10\sim1000$Hz的范围内，计算出渗透深度δ_T的结果，如图5.13-38所示。因此，对工业用频率来说，当二次导体采用铁板的时候，δ_T大约是2mm，即使将铁板的厚度加厚，因为磁通渗透得不那么深，可以说是无效的。

为了保证机械强度，使磁通易于通过，并且从经济上着眼，如果采用铁等强磁性体作为二次导体，励磁电流就少。然而对工业用频率来说，当上述的铁板的厚度在2mm以上时，集肤效应的影响变得显著，亦即厚度增加推力也不增加，特性比预想的坏。这一点已经有理论研究成果。

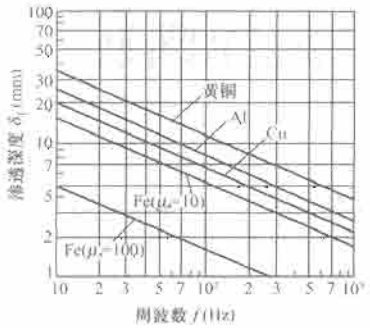


图5.13-38 渗透深度与频率的关系

（2）次级材料的影响

直线感应电动机的次级材料如前所述，主要为两大类：一类为单一材料的，通常有用铁磁材料，或双边横向磁通时用导电材料，如铜、铝等；另一类为复合材料，方式比较多，如用铜与铁复合的，铝与铁复合的，或铜、铝、铁复合在一起等。这些不同材料所具有的不同磁导率和电导率，直接影响了直线感应电动机的特性。图5.13-39和图5.13-40分别表示各种不同单一材料次级直线感应电动机的特性曲线和各种不同复合材料次级直线感应电动机的特性曲线。

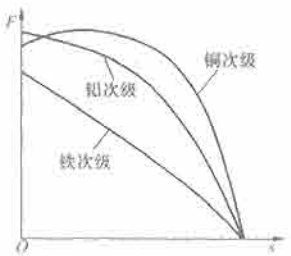


图5.13-39 不同单一材料次级直线感应电动机的F—s曲线

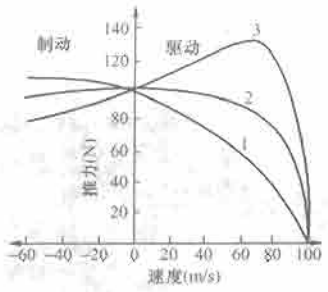


图5.13-40 三种次级复合材料的速度—推力典型曲线

1—钢-铝次级；2、3—不同电阻率的铜—钢次级

（3）次级结构的影响

有时也可以采用其他办法来改变特性曲线。例如，采取结构上的措施也可以达到这个目的。为此，在需要提高牵引力的地方可以改变横断面。这就是说，可以使次级部分变更厚度，变更高度，开凹槽等（见图5.13-41）来改变直线电机的特性曲线。

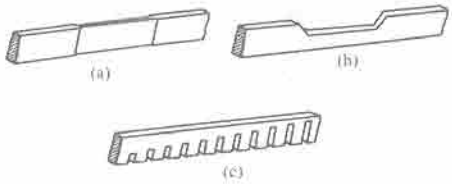


图5.13-41 次级改变阻抗的三种办法

（a）变更厚度；（b）变更高度；（c）开凹槽

7.2 直线感应电动机的应用实例

7.2.1 扁平型电机应用实例

（1）邮政包刷分拣机

传统邮政包刷分拣机采用旋转电机加链条驱动，速度慢，效率低，噪声大。采用扁平型直线感应电动机驱动可完成托盘式包刷分拣机，以及带式高速包刷分拣机。图5.13-42为直线电机驱动包刷分拣机的外形图。

（2）智能化推挂式物流传输系统

图5.13-43为智能化推挂式物流传输系统示意图。



图5.13-42 直线电机驱动包刷分拣机的外形图

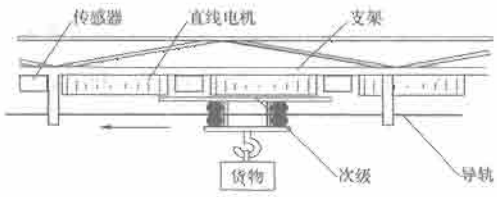


图5.13-43 智能化推挂式物流传输系统示意图

（3）直线感应电动机驱动的轻轨、地铁与城轨车辆交通

由直线电机驱动的非磁浮和低速磁浮城轨车辆交通，由于技术成熟，造价合适，结构简单，性能优异，在世界许多

国家得到了应用。图 5.13-44 为加拿大温哥华的直线感应电动机驱动的地铁，直线感应电动机的初级在车上，次级在轨道上。



图 5.13-44 加拿大温哥华直线感应电动机驱动的地铁

7.2.2 圆筒形电机应用实例

(1) 直线电机驱动的电梯

直线电机驱动的电梯和传统的电梯相比，具有结构简单、占地面积少、高速、节能、可靠性高及抗振等优点。直线电机驱动电梯有多种结构型式，如采用圆筒形直线感应式、双边形感应式和永磁同步直线电动机式等。

(2) 直线电机驱动的冲压机

这种直线电机驱动的冲压机和传统的机械式冲压机相比，具有以下优点：

1) 结构简单，体积小、重量轻，噪声小，冲压吨位，工作频率高，冲压速度可调，节能效果明显，工作效率高。

2) 具有自动控制功能，采用智能化控制系统，易于实现自动化生产。

3) 制造周期大大缩短，加工量少，节材，显著降低成本，可以满足不同加工安装需要。

8 直线同步电动机及其应用

8.1 直线同步电动机的原理、结构与特性

8.1.1 直线同步电动机原理概述

直线同步电动机的磁极一般由直流励磁绕组励磁，或者由永磁磁体励磁，如图 5.13-45 所示。在定子绕组产生的气隙行波磁场和磁极磁场的共同作用下，气隙磁场对磁极动子产生电磁推力。在这个电磁推力的作用下，如果初级是固定不动的，那么磁极就沿着行波磁场运动的方向作直线运动。磁极移动的速度 v 与行波磁场的移动速度一致。

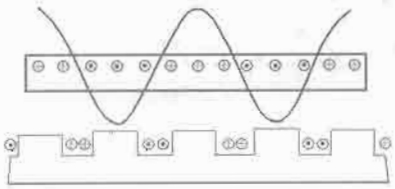


图 5.13-45 长定子直线同步电动机的示意图

与直线感应电动机相比，直线同步电动机具有更大的驱动力，通过对驱动电源的调节，其控制性能、位置精度更好。

直线同步电动机在高精度直线驱动中获得了广泛应用，近年来它作为高速地面运输系统和直线提升装置的驱动系统而更加受到重视。各种类型的直线同步电动机成为直线驱动的主要选择。

8.1.2 直线同步电动机的分类

直线同步电动机根据其动子励磁的不同，可分为动子磁极由直流电流绕组励磁的常规直线同步电动机和动子磁极为永磁体的永磁直线同步电动机。前者励磁磁场的大小由直流电流的大小决定。通过控制励磁电流可以改变电动机的切向牵引力和侧向吸引力。这种结构使得电动机的切向和侧向力可以分别控制。高速磁悬浮列车的长定子直线同步电动机即采用这种结构。永磁直线同步电动机磁极磁场由永磁体提供，磁极动子无需外加电源励磁，使电动机的结构得到简化，整体效率提高，磁极磁场不可调。

8.1.3 直线同步电动机的结构型式

直线同步电动机的结构型式不同，具有不同的电气特性，适合应用于不同的工作场合。在实际选择应用时，应根据具体要求，选择合适的结构型式。

1) 扁平形单边长定子直线同步电动机。扁平形单边长定子直线同步电动机的动子与定子之间具有切向驱动力和法向的吸引力。电动机励磁可通过调节磁极绕组的电流大小来改变。在运行时，长定子绕组是分段切换通电的，由于每段通电定子下只有一部分覆盖磁极，因此定子绕组的漏抗有较大比例。电源电压的一部分用于克服漏抗压降。

2) 圆筒形直线同步电动机。圆筒形直线同步电动机结构如图 5.13-46 所示，即为一种外形如旋转电机的圆柱形的直线电机。这种直线电机一般均为短初级、长次级形式。

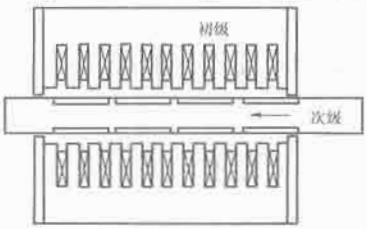


图 5.13-46 圆筒形直线同步电动机结构

3) 永磁直线同步电动机。永磁直线同步电动机兼有永磁电机和直线电机的双重特点。与直线感应电动机相比，永磁直线同步电动机的力能指标高、体积小、重量轻，且具有发电制动功能，在许多领域得到了应用。例如，垂直升降输送系统，高速地面运输系统，往复式空气压缩机等。但永磁同步电动机也存在着一些缺点，主要是造价较高，控制较复杂等。图 5.13-47 为单边扁平形永磁直线同步电动机的结构图。

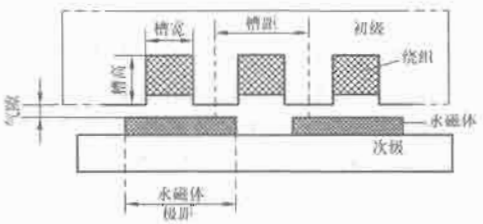


图 5.13-47 单边扁平形永磁直线同步电动机结构

4) 混合励磁直线同步电动机。在直线同步电动机当中，还有采用高性能永磁材料与电励磁线圈混合的励磁系统，也称为可控永磁直线同步电动机。其主要特点在于基本励磁由永磁提供，而动态调整由电励磁来完成，故突出了可控性的优点。

8.1.4 直线同步电动机的特性

图 5.13-48 为一个通电轨道段的各相三角形联结。直线同步电动机在不同功率角下的电流 I、推力 F_{st}、效率 η 与功率因数 $\cos\varphi$ 的特性曲线如图 5.13-49 所示。

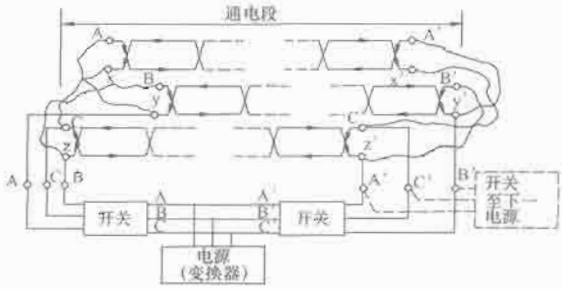


图 5.13-48　一个通电轨道段的各相三角形联结

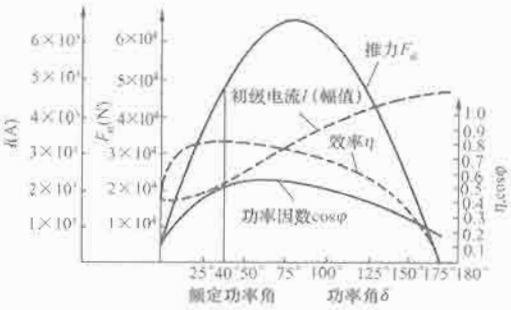


图 5.13-49　直线同步电动机的特性曲线

8.2　直线同步电动机应用实例

8.2.1　直线同步电动机在磁悬浮列车上的应用实例

直线同步电动机一个最典型的应用是磁浮交通的应用。它所具有的高速、舒适、安全、无污染、无噪声、无振动、节能等优点，越来越获得人们的青睐。图 5.13-50 是长定子直线同步电动机驱动磁浮列车的外形图。



图 5.13-50　直线同步电动机驱动的磁浮列车的外形

图中驱动部分为直线同步电动机。初级（定子组）安装在线路上，使车辆更轻，供电方便，技术更为简单。图中悬浮线圈产生电磁吸引力，将车辆从下面拉向轨道，并保持一定的垂向距离。图中的导向线圈产生的磁力则使其车辆与轨道有一定的侧向距离。这一切均可通过一整套高精度的电子调整系统保证车辆始终不变地定向悬浮在 10～15mm，并直线运动。悬浮和导向系统以及车上设备的用电由悬浮直线发电机供给，如超导悬浮，则可使车辆悬浮到 100mm 以上。

8.2.2　永磁直线同步电动机在精密加工上的应用

为了提高生产力和改善加工质量，超高速、超高精度加工是关键技术。目前对数控机床的进给速度要求已从 6～8m/min 提高到大于 50～60m/min，加速度要求达到 1～5g。这个指标对具有中间传动和变换环节的传统进给驱动系统是无法实现的，因而需要寻找一种新的执行元件。这就使得新一代直线电动机进给驱动系统应运而生。20 世纪末以来，从世界四大国际机床展（欧洲 EMO、美国 IMTS、日本 IIMTOF、中国 CIMT）表明，直线电动机直接驱动不断应用于数控机床、加工中心、压力机等是一种趋势。

直线电动机驱动具有高推力、高速、高精度、平滑进给运动等特性，机床进给系统采用直线同步电动机直接驱动与原旋转电动机传动方式的最大区别是，取消了从电动机到工作台（拖板）之间的机械中间传动环节，即把机床进给传动链的长度缩短为零，故这种传动方式称为“直接驱动”，也称“零传动”。直接驱动避免了丝杠传动中的反向间隙、惯性、摩擦力和刚性不足等缺点，带来了原旋转电动机驱动方式无法达到的性能指标和优点。

9　直线直流电动机及其应用

9.1　直线直流电动机的基本原理、结构与特性

（1）直线直流电动机的原理与结构分类

直线直流电动机最简单的工作原理如图 5.13-51 所示。线圈可沿铁棍轴向自由移动。在线圈的行程范围内，永磁体给予它大致均匀的磁场 B_δ。当线圈中通入直流电流 I_a 时，通电导体在磁场中就会受到电磁力的作用。这个电磁力的方向可由弗莱明左手定则来确定。改变直流电流 I_a 的方向就可改变线圈受力的方向。电磁力 F(N) 的大小为

$$F = B_\delta l I_a = B_\delta l N I_a$$

式中，N 为线圈匝数；l 为线圈导体每匝处在磁场中的平均有效长度，m；B_δ 为线圈所在空间的磁感应强度，T；I_a 为线圈导体中的电流，A。

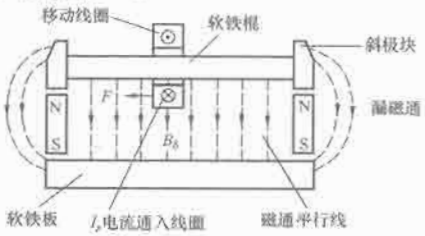


图 5.13-51　直线直流电动机的基本工作原理

只要线圈受到的电磁力大于线圈支架上存在的静摩擦阻力 F_s，就可使线圈产生直线运动。这就是直线直流电动机工作的基本原理。

直线直流电动机的结构有多种类型，根据磁动势（或磁通）源的不同，直线直流电动机可分为永磁式和电磁式两大类。永磁式是采用永磁体作磁通源，而电磁式是用直流电流来励磁的。永磁式直线直流电动机容易达到无刷无接触运行。一般来说永磁式电动机的制造成本比电磁式的高，而电磁式比永磁式多了一项励磁损耗。根据移动部件的不同，直线直流电动机可分为动线圈式（简称动圈型）和动磁体式（动铁型）。下面分述永磁式和电磁式的基本结构。根据有无电刷，还可分为有刷和无刷两种。直线直流电动机的基本结构分类如图 5.13-52 所示。

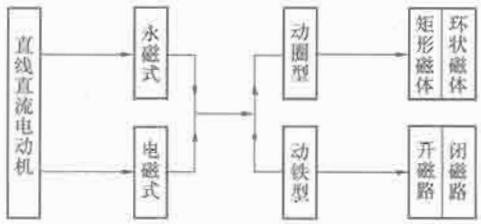


图 5.13-52　直线直流电动机的基本结构分类

（2）永磁式直线直流电动机

永磁式直线直流电动机可做成动圈型，也可做成动铁

型。动铁型需要一个固定的长电枢，电枢绕组用铜量大，结构复杂，移动系统重量也较大，惯性大，消耗功率多。优点是电动机行程可做得很长，又可做成无接触式直线直流电动机。目前，实际生产中动圈型用得多。图 5.13-53 中列出了永磁动圈型直线直流电动机的典型实用结构。

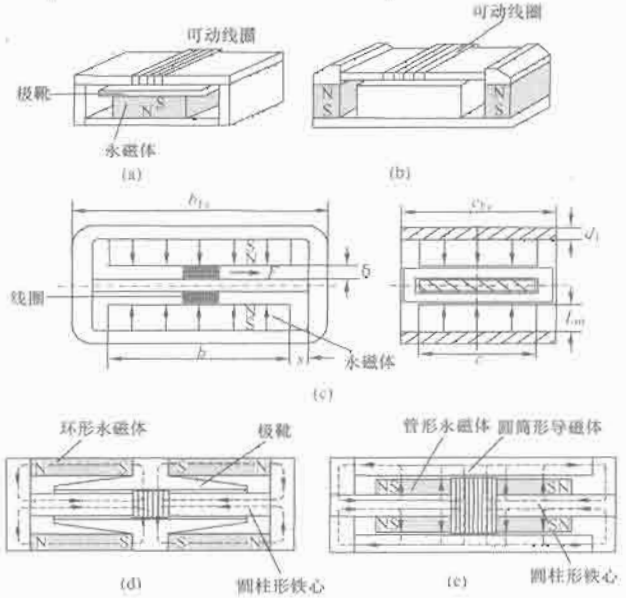


图 5.13-53 永磁动圈型直线直流电动机典型结构

永磁直线直流电动机按结构特征可分两个基本类型，如图 5.13-53 (a) ～ (c) 所示的带有平面矩形磁体的永磁直线电动机和如图 5.13-53 (d)、(e) 所示的带有环形磁体的永磁直线电动机。带有矩形磁体的电动机结构简单，制造工艺良好，但线圈绕组没有得到充分利用；在小气隙中，移动系统的定位较困难，漏磁通很大，即磁体未充分利用。磁体为环状的直线电动机结构主要是圆柱形的，其移动系统和定子部分间的小气隙可用机床加工来保证。电动机线圈的有效长度能得到充分利用。环形磁体的直线电动机结构又可分为磁体磁化方向沿电机轴向和径向两大类。在第一类电动机中，轴向磁化的环形磁体通过圆柱铁心和特殊形状的磁极极靴构成闭路，如图 5.13-53 (d) 所示。动线圈沿轴向在圆柱形铁心和极靴之间的气隙中移动。尽管线圈导体得到充分利用（电流通过时，绕组沿全部周边都会产生牵引力），但本类型的电动机体积较大，这是为了保证在气隙中产生辐射方向的磁通，故极靴铁心必须做成特殊的形状；另外永磁体开孔加工有困难，力的传递必须从轴伸端引出，此外，在这种电动机中漏磁很大。在第二类电动机中，径向磁化的管形永磁体［见图 5.13-53 (e)］通过安置在外部的同心圆筒形导磁体和内部圆柱形铁心的导磁体形成闭合磁路。线圈可在圆筒形导磁体和管形磁体之间的气隙中顺着电动机的轴向自由地移动。这类电动机中线圈导体也得到了充分利用。此外，实际上漏磁通很小，因而永磁体得到充分利用。这类直线电动机的主要优点是结构简单和外形尺寸不大。由于磁化方向是辐射方向，在本结构中没有必要采用复杂的导磁体。但小直径的径向充磁较困难。

(3) 电磁式直线直流电动机的结构

永磁式直线直流电动机可改为电磁式直线直流电动机，只要把永磁体换成相应的电磁铁就可以了。如图 5.13-53 (e) 所示，可得如图 5.13-54 所示的电磁式动圈型直线直流电动机。对于动圈型直线直流电动机，电磁式的成本要比永磁式的低，这是因为：①永磁式动圈型直线直流电动机需要在电动机整个行程上铺上一层价格昂贵的永磁体，如图 5.13-53 (e) 所示。电磁式只需要使用一般材料的励磁线圈通以直流电就可产生所需要的磁动势。②永磁材料机械加工困难，加工费用较大。③电磁式可通过串、并联励磁绕组和附加补偿绕组等方法，使电动机性能得到改善，励磁可调，而永磁式就缺少这种灵活性。

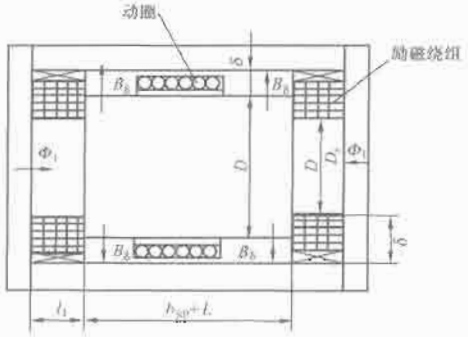


图 5.13-54 电磁式动圈型直线直流电动机

(4) 无刷直线直流电动机

有刷直线直流电动机工作行程一般不宜太长，且有时有接触火花干扰电子设备。如图 5.13-55 所示的钕铁硼音圈有刷直线直流电动机磁路，当电动机的动圈长度 L 不变时，增加行程必须增加钕铁硼永磁体轴向长度 L_N 才能保持电动机有恒定推力。L_N 越长，汇聚到电动机内心柱磁通越多，这就加剧了内心柱截面和心柱根部磁通密度饱和程度，从而造成漏磁增加，因此不宜做得太长。

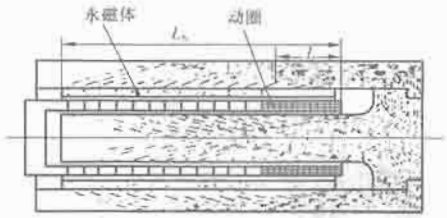


图 5.13-55 有刷直线直流电动机磁路

有鉴于此，直线直流电动机也向无刷直线直流电动机发展。图 5.13-56 就是一种扁平形的无刷直线直流电动机的磁路结构图。

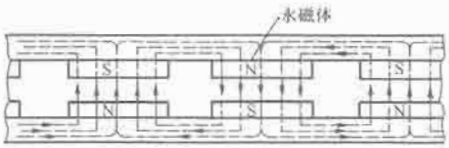


图 5.13-56 无刷直线直流电动机的磁路结构

图 5.13-56 的电动机磁通不是一端闭合，而是随着气隙两边的异极性磁体分别构成闭合回路。气隙中又无铁心，不存在磁通密度饱和问题。电动机的行程在动子线圈轴向长度不变时，由定子磁路长度而定，理论上可以做到无限长。但在整个行程中由于气隙中磁通方向交替变化，要获得一定方向的推力，动子线圈中电流方向必须换向。其电子换向的基本原理与旋转无刷直流电动机的相同。

无刷直线直流电机与一般无刷旋转直流电动机不同之处在于除检测定子动子相对位置外，还需增加一个位置方向传感器，以便在无外接控制信号时也能自动往复直线运动。

9.2 直线直流电动机的应用实例

9.2.1 永磁直线直流电动机应用实例

在精密控制系统中，要实现精密跟踪，必须使控制系统尽量线性化，而大力矩低转速的旋转电动机由于极数多、直径大、电刷多，产生的摩擦力矩和惯量大，使控制系统产生严重的非线性，因而需要寻找一种新的执行元件，能适应小框架、低惯量、小范围运动转角（±20°）的运动系统。本例采用小型永磁直线直流电动机作为精密跟踪系统中的小惯量框架驱动元件，这样不仅可以摆脱动子铁心的机械惯性，而且可采取适当的措施补偿电感引起的电流惯性。实验证明，使用直线直流电动机的系统比使用旋转力矩电动机的系统跟踪精度提高了一个数量级。此种直线直流电动机经过适当改造，还可用于记录仪中笔的纵横走向的驱动和电表试验中探测头的驱动等其他一些微小系统的驱动。

直线直流电动机的结构示意如图 5.13-57 所示。在低碳钢圆柱铁心的外表面，绕上单层绕组，形成电枢。它由两个匝数一样、绕向相反的线圈组成，整个绕组经浸漆处理，得到一个无电刷（无换向器）的电动机结构。电动机产生磁场的部件是压铸成型的永磁体（或圆柱形励磁绕组），固定于由低碳钢组成的定子内表面上，这样在永磁体与低碳钢心轴之间建立了磁通，磁通通过气隙、极靴、端板以及外壳构成了回路。这里不设电刷，当电流直接通过次级电枢接线进入电枢，正交穿过气隙径向磁通时，产生轴向推力。在装调电动机时，用特制心轴来调动子与定子的同轴度，消除附加产生的磁阻力。

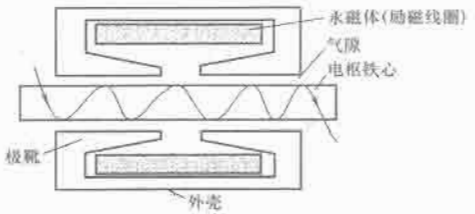


图 5.13-57 直线直流电动机结构示意图

9.2.2 直线直流伺服电动机在机床上的应用实例

本例是一个直线直流电动机在机床上的应用。活塞外圆加工的一种软靠模加工车床，采用圆筒形永磁直线直流伺服电动机作为圆弧切削的执行机构。它具有高频响、高效率、高精度的特点，可以实现机床的高速运行。这个直线直流伺服系统由直线直流电动机、速度检测、位置检测、伺服控制器四部分组成，其结构如图 5.13-58 所示。空载时气隙中的磁场由永磁体产生，永磁体径向磁化，由通过内、外圆筒形的导磁部分形成闭合回路。当系统需要工作时，由控制系统的放大器输出直流信号，给次级的圆筒形绕组通入直流电流，载流导体在磁场中就会产生一定的电磁力，次级就运动起来。装在次级上的速度感应器的永磁体和光栅尺的指示光栅也随之运动起来。运动过程中，速度检测单元和位置检测单元检测次级的速度和位置，将信号传递到控制系统，形成一个闭环系统，实现直线伺服系统的高精度、高频响运动。

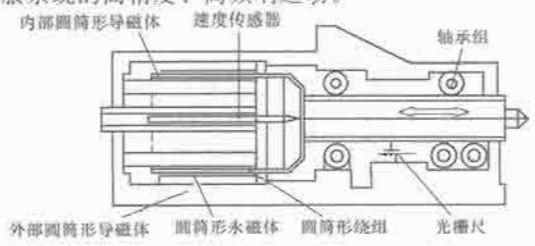


图 5.13-58 直线伺服电动机结构图

10 直线步进电动机及其应用

10.1 直线步进电动机的结构与特性

直线步进电动机是一种将输入的电脉冲信号转换成微步直线运动的驱动装置。当这种电动机外加一个电脉冲时，就会直线地运动一步并准确地锁定在所希望的位置上。因为其运动形式是直线步进的，因而称为直线步进电动机。直线步进电动机可广泛地应用于各种精密设备，如自动绘图仪、计算机设备、智能仪器仪表、机器人、电子设备及各种自动化检测、控制等领域当中。

开环直线步进电动机可以提供位置控制最经济的解决方案。输入电流脉冲信号可由数字控制器或微处理器来提供。直线步进电动机在不需要闭环控制的条件下，能够提供具有较高精度和可靠性的位置和速度控制。这是直线直流电动机和直线感应电动机所不能做到的。直线步进电动机结构简单，可动部分重量轻，惯性小，无漂移，无累积定位误差，且在开环控制条件下，就能够做到高速、高定位精度。在一些高要求的控制系统中，这是一种理想的直线驱动装置。

直线步进电动机按照其轴向运动分为单轴、双轴和三轴。单轴通常为长条形而双轴通常为扁平的方形。双轴电机可以方便地沿同一平面的两个轴运行，而使用多个单轴直线步进电动机也可以实现多轴驱动。三轴电机则可由一台双轴电机加上一台单轴电机组合而成。

直线步进电动机按其电磁推力产生的原理，又可分为变磁阻式直线步进电动机和混合式直线步进电动机两大类。后者利用永磁体供磁和电流励磁巧妙结合的最佳方案来产生电磁推力。

10.1.1 单轴向直线步进电动机

图 5.13-59 表示出 6 种常见的单轴向直线步进电动机结构型式。图 5.13-59（a）是单边扁平型结构。这种结构定子常是一块开有平行槽的条形铁心平板，动子常是用一块条形永磁体和放在它两端的两个 Π 形铁心的电磁铁装配而成矩形滑块。铁心均可采用电工钢片叠压而成，铁心损耗小，但漏磁比较大。要保证定、动子之间的气隙像圆筒形一样小而均匀比较困难。由于结构是单边形，定、动子之间存在着很大的单边磁拉力，因而会造成较大的阻力、振动和噪声。这种结构型式主要的优点是结构简单，零部件少，动子惯性小，铁心可用硅钢片叠压而成，涡流损耗小，电气阻尼小，高速能力强。图 5.13-59（b）是双边扁平形结构。如图 5.13-59（a）所示两个相同的单边形动子结构，对称地安装在条形双边开有均匀等距平行槽的定子铁心的两边，如果安装得好，可以做到使上述单边磁拉力不存在。这种结构型式显然比图 5.13-59（a）所示的结构性能好；但零部件数约为单边形的两倍，成本比较高。图 5.13-59（c）为圆筒形结构。磁路对称性好，容易做到基本上没有单边磁拉力，漏磁少，铁心和线圈的利用率高，所以推力对动子重量比值最大。圆筒形结构的平行槽用普通车床就可以加工成形，不像扁平形结构必须要用铣床铣槽，加工成本低。图 5.13-59（d）是将图 5.13-59（a）中的永久磁铁部分用直流电流励磁的方式来代替。图 5.13-59（e）是将图 5.13-59（c）中的永磁体用环形线圈通以直流电来取代，它们都称为电磁式直线步进电动机。这类步进电动机，可以通过改变励磁电流来调节励磁，从而可以灵活地改变步进电动机的机械特性，可以灵活地设计出不同推力和吸力要求的各种步进电动机而不会受到永磁体磁性的限制。图 5.13-59（f）是一种新发展起来的电磁式螺旋型直线

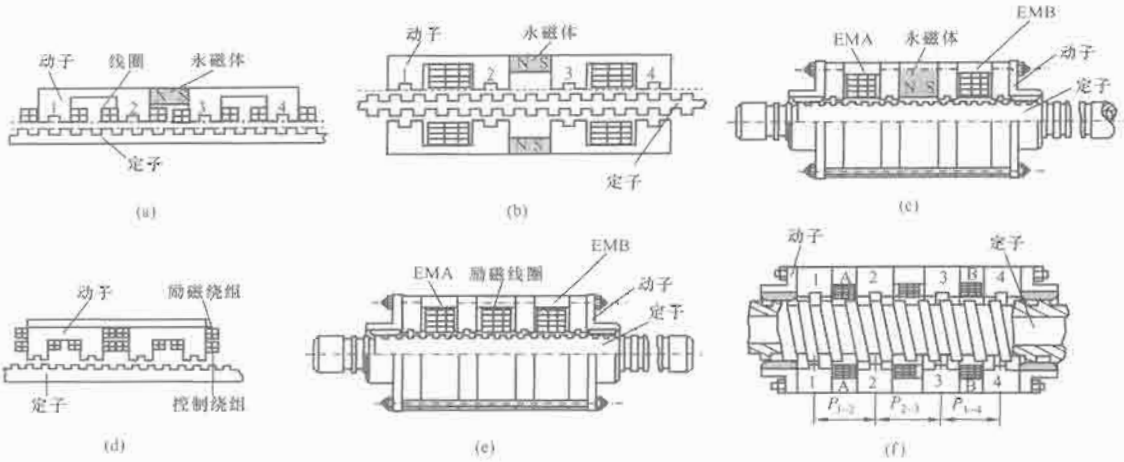


图 5.13-59 不同结构型式的单轴向直线步进电动机

步进电动机的结构。这种结构的特点是用普通的车床就可以连续加工成形，不需要像平行槽结构那样断续逐条地加工槽形，加工成本低，而电动机性能还可以得到改善。

10.1.2 双轴向和三轴向直线步进电动机

以上介绍的都是单轴向运动的直线步进电机。实际上也可以做成双轴向（二维的）和三轴向（三维的）直线步进电动机。双轴向直线步进电动机可用两个初级动子安装在同一动子机架上组成，如图 5.13-60 所示。两个初级动子运动的轴线相互垂直，构成了所谓平面直线步进电动机。为了使平面直线步进电动机能够在平板面上作二维的步进运动，必须使次级台板上开有相互垂直的槽齿，因而形成了如图 5.13-60 所示的格子式的次级台板。

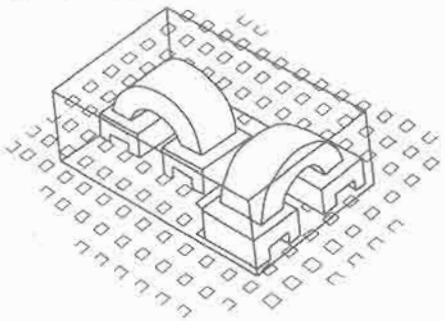


图 5.13-60 双轴向直线步进电动机
（平面步进电动机）

三轴向直线步进电动机，可在双轴向平板电动机的动子上再加上一个可沿高度方向直线步进移动的圆柱形直线步进电动机初级，其结构如图 5.13-61 所示。

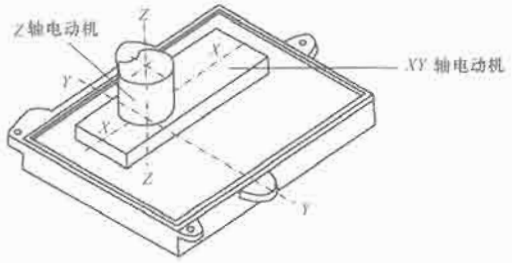


图 5.13-61 三轴向直线步进电动机

10.2 直线步进电动机的应用实例

自动绘图机是一种机电设备，本体由绘图台和控制器两部分组成。传统的平面式绘图台的驱动机构由旋转电动机及将旋转运动转换成直线-平面运动的机械传动机构组成，因此传统的平面式绘图机结构复杂，可动部分较重，可靠性差，寿命较短。

直线步进电动机直接将电信号转换成机械平面运动，驱动绘图笔（或刻刀、光源等），实现高速度、高精度、高可靠性及耐久性的平面运动及定位。

11 其他各种直线电动机及其应用

11.1 直线振荡电动机

在直线电机中自动产生高频往复直线运动的电机称为直线振荡电动机。

直线振荡电动机常被应用于小型空气压缩机、照相机电磁快门、扬声器、电锤机、搅拌机、冷冻机、缝纫机、打包捆扎机、电磁泵、纺织梭子的推进机构等。

直线振荡电动机从它的工作原理上来说，有两种基本类型，即直线感应振荡电动机和直线同步振荡电动机。其中，应用较多的是直线同步振荡电动机。

11.1.1 直线感应振荡电动机

直线感应振荡电动机的原理结构如图 5.13-62 所示。电动机的初级绕组是分成两半安排的，并使每一半绕组产生的位移磁场的方向都是指向初级中心。或者说两台背靠背安放的直线感应电动机就构成了一台直线感应振荡电动机。这种振荡电动机的主要缺点是：电动机始终处在起动和制动状态中，能量损耗大，效率低，发热厉害；另外漏磁大，功率因数低。因此实际应用有困难。

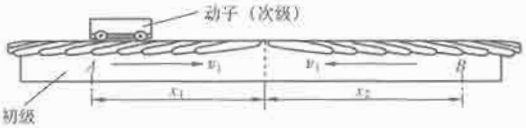


图 5.13-62 直线感应振荡电动机原理结构示意图

另一种直线感应振荡电动机是推斥型感应振荡电动机。它的电磁推力形成是和推斥型悬浮电动机有些相似。两相初级所组成的直线电动机只能单方向推进，但是当初级的两相分别接到频率为 f_1 和 f_2 的两个电源上，情况就不同了。在某一瞬时，第一相的电流超前于第二相的电流，因而产生向某一方向移动的磁场；过后，两相电流同相，就不产生移动磁场了。再经过一段时间，第一相的电流落后于第二相的电流，结果产生一个反向移动的磁场。这样实际上就产生了一个周期性的振荡磁场。如果一个导电次级安放在这样的磁场

内，它将以某一频率振荡，此频率等于两个电源频率的差额。次级是一个短路环，其原理结构如图 5.13-63 所示。在移动磁场的作用下，产生感应涡流。载有涡流的次级在磁场的作用下，会受到电磁力的作用，带动次级跟随着移动磁场运动。这就是两相直线感应振荡电动机的作用原理。

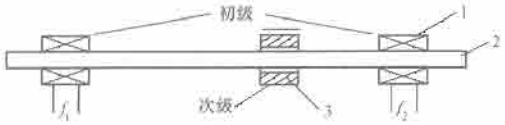


图 5.13-63　两相直线感应振荡电动机
1、2—定子；3—动子

这类振荡电动机的缺点仍然是损耗大，效率低，功率因数低。

11.1.2　直线同步振荡电动机

直线同步振荡电动机的主要优点是出力大，损耗小，效率高。缺点是动子的振荡频率严格受交流电源频率控制，并利用电动机中的同步电磁吸引力来产生振荡运动。但它仍然是目前最有发展前途的振荡电动机。

如果按照可动体的类型来考虑，直线同步振荡电动机及其装置大体上可分为线圈可动型、铁心可动型和永磁体可动型。表 5.13-4 就是这三种类型直线同步振荡电动机及其驱动装置的大致情况。

表 5.13-4　　直线同步振荡电动机及其驱动装置分类

类　别	线圈可动型	铁心可动型	永磁体可动型
可动体	线圈（导体）	铁心（强导磁体）	永磁体（铁氧体、稀土类）
动子质量	小	大	中
振荡频率	高	低	中
应用机种	扬声器、声频测试仪、电子缝纫机等	小型空气压缩机、冷冻机、凿岩机、打桩机等	振动机、振动型搅拌机

下面就这三种直线同步振荡电动机装置作简要介绍。

（1）线圈可动型直线同步振荡电动机及其装置

线圈可动型直线同步振荡电动机最典型的应用是扬声器，常称它为音圈电机，它实际上是一台直线直流电动机。图 5.13-64 是外磁场扬声器的基本构造。

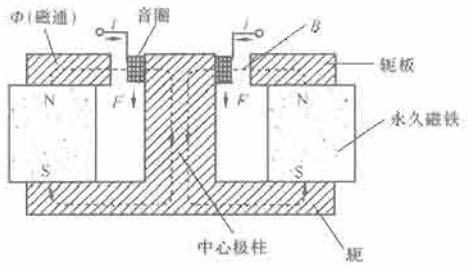


图 5.13-64　外磁场扬声器的基本构造

除上述应用装置外，动圈型直线振荡电动机也可以作为振动试验台的振动发生器和冷冻机中的压缩机。如图 5.13-65 所示的采用动圈可动型直线振荡装置的冷冻机构造。由于线圈和活塞在机械上相连接，因此线圈中流过交流电流，活塞就上下运动。

（2）铁心可动型直线同步振荡电动机

图 5.13-66 表示这种电动机的基本构造。在上下固定铁心之间安放着可动铁心，这个可动铁心的上下方向用 4 个弹簧支撑。其动作原理如下：首先在绕于可动铁心上的线圈中通入直流电流，产生内虚线所示的直流磁通 Φ_{dc} 流过上下的固定铁心。其次，在绕于固定铁心上的线圈中通入交流电流，就产生如图所示的外虚线交流磁通 Φ_{ac}。如果两束磁通同样大小，则上部的固定铁心中的磁通成倍增加，而下部的固定铁心中的磁通相互抵消，因而可动铁心被吸向上侧。交流电流的极性一变化，可动铁心就被吸向下侧，随着交流电流的交变，可动铁心就会跟着发生上下振动。这就是它的工作原理。

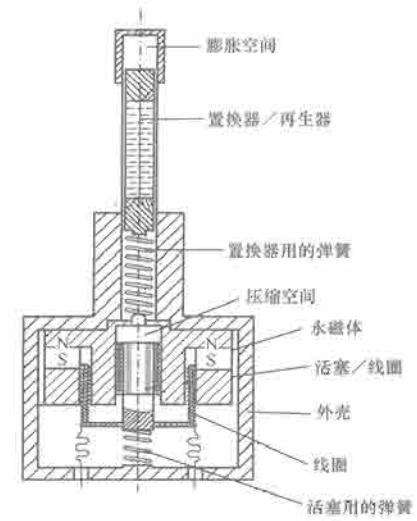


图 5.13-65　线圈可动型直线振荡装置的冷冻机

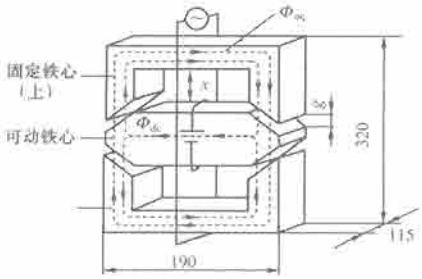


图 5.13-66　铁心可动型直线同步振荡电动机结构

（3）永磁式动铁型同步直线振荡电动机

永磁式动铁型同步直线振荡电动机和电磁式相比，永磁式可以提高 2～3 倍材料利用率，效率比电磁式提高 15%，可以消除由于高频振荡而在励磁绕组中引起高电压的缺点，还可以节省直流励磁电源。

11.2　直线—旋转混合型电动机

有时某些设备既需要直线运动，又需要旋转运动，甚至还需要螺旋运动，这种情况下，直线—旋转混合型电动机将是一种合适的驱动装置。

直线—旋转混合型电动机是将直线电动机和旋转电动机组合而成，如将筒形直线感应电动机和旋转感应电动机进行组合，就成了筒形直线—旋转混合型异步电动机。该电动机的定子上装有两套绕组，共用一个动子（转子）。当其中一套绕组通三相电流时，产生行波磁场，电动机的动子（转子）做直线运动；当另一套绕组通三相电流时，则产生旋转磁场，电动机的转子（动子）做旋转运动；若两套绕组同时通电，则动子（转子）可以做螺旋运动。因此，该电动机可以有直线、旋转和螺旋三种运动方式。从而使该电动机适用于多种不同使用要求的设备。它可以省去相应的中间传动机构，使

整个系统结构简化，控制、维护方便。例如，该电动机可在自动钻床、各种钻机、绕线机、机器人等方面得到应用。

11.3 直线发电机

直线发电机大部分用于控制系统和自动化系统中，主要作为直线测速发电机，它是一种输出电压与直线速度成正比例的信号元件。该电机是按动磁式的电磁感应原理制成的。通常由定子和动子两部分组成，定子为两套参数相同的绕组，动子主要是永磁材料，提供一个不变的磁场。动子与被测物体相连接，当被测物体直线运动时，则直线测速发电机便输出一个与直线速度成正比例的信号电压。电机具有结构简单、紧凑、使用方便、输出斜率高、纹波系数小、抗电磁干扰能力强等特点。该电机有圆柱形和锥形等不同结构。

直线测速发电机已被应用于计算机磁盘存储器磁头定位，伺服机构作速度检测元件，在液压伺服阀中作动态测量以及电影经纬仪等各种直线伺服机构中作测速和反馈元件等。

当然也有真正用于发电的直线发电机，如磁浮列车中的直线发电机就用于发电以提供列车用电源。其他一些直线机械能也可通过直线发电机来产生电能。

11.4 非电磁类直线驱动器

除电磁直线驱动器以外，近年来，其他各种非电磁类（所谓非电磁类，指的是该类装置不按通常的电磁定律来运动）的直线驱动器也不断出现，尤以压电材料和磁致伸缩材料制成的直线驱动器最为红火，发展较快。此外，其他如光直线驱动器、超导直线驱动器、静电直线驱动器、金属氢化物直线驱动器、形状记忆合金直线驱动器，橡胶直线驱动器、高分子凝胶直线驱动器等，也在不断发展。

12 部分产品技术数据与外形尺寸

12.1 部分直线感应电动机的技术数据与外形尺寸

本书仅提供国内部分厂家直线感应电动机的技术数据与外形尺寸。

12.1.1 XY系列扁平形直线感应电动机技术数据与外形尺寸

XY系列扁平形直线感应电动机是我国企业根据部颁的JB/T 7823—1995《三相直线异步电动机》标准的基础上，进一步参照国外产品型号的编制方式所发展的产品，与2005年修改的《三相扁平形直线异步电动机》标准有差异。部分厂家的技术数据见表5.13-5。

（1）XY系列扁平形直线感应电动机型号说明

XY系列扁平形直线感应电动机产品的名称、规格代号组成如图5.13-67所示。

（2）XY系列扁平形直线感应电动机的主要技术数据及铁心尺寸

XY系列扁平形直线感应电动机主要技术数据及铁心尺寸见表5.13-5。

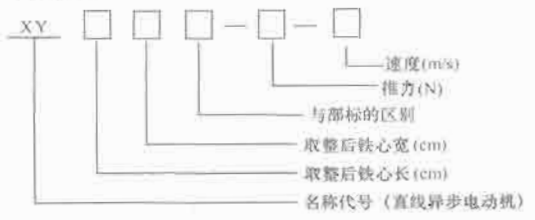


图5.13-67 XY系列扁平形直线感应电动机型号组成

表5.13-5 XY系列主要技术数据及铁心尺寸（三相）

型号	连续运行		15%持续率		铁心主要尺寸（长×宽×高）（mm×mm×mm）
	推力（N）	电流（A）	推力（N）	电流（A）	
XY1807-8-4.5	8	0.2	40	0.912	184×70×20
XY1807-15-4.5	15	0.35	75	1.71	184×70×40
XY1807-20-4.5	20	0.46	100	2.28	184×70×60
XY1807-25-4.5	25	0.57	125	2.85	184×70×80
XY1807-28-4.5	28	0.64	140	3.192	184×70×100
XY1807-35-4.5	35	0.8	175	3.99	184×70×120
XY1807-40-4.5	40	0.92	200	4.56	184×70×140
XY1807-50-4.5	50	1.14	250	5.7	184×70×160
XY3606-40-4.5	40	0.85	200	4.56	364×65×60
XY3606-55-4.5	55	1.2	275	6.27	364×65×80
XY3606-70-4.5	70	1.5	350	7.98	364×65×100
XY3606-80-4.5	80	1.7	400	9.12	364×65×120
XY3606-100-4.5	100	2.2	500	11.4	364×65×140
XY3606-110-4.5	110	2.4	550	12.54	364×65×160
XY3606-120-4.5	120	2.5	600	13.68	364×65×180
XY3606-140-4.5	140	3.0	700	15.96	364×65×200
XY7408-110-4.5	110	2.4	550	12.54	735×80×80
XY7408-140-4.5	140	3.0	600	15.96	735×80×100
XY7408-160-4.5	160	3.4	800	18.24	735×80×120
XY7408-190-4.5	190	4.1	950	21.66	735×80×140
XY7408-220-4.5	220	4.7	1100	25.08	735×80×160
XY7408-240-4.5	240	5.1	1200	27.36	735×80×180
XY7408-280-4.5	280	6.0	1400	31.92	735×80×200
XY7408-300-4.5	300	6.4	1500	34.2	735×80×220

12.1.2 XYT系列圆筒形直线感应电动机的技术数据与外形尺寸

XYT系列圆筒形直线感应电动机是国内企业生产的产品，以下所列是其中的部分规格。

（1）XYT系列圆筒形直线感应电动机型号说明

XYT系列圆筒形直线感应电动机型号说明如图5.13-68所示。



图5.13-68 XYT系列圆筒形直线感应电动机型号组成

（2）XYT系列圆筒形直线感应电动机的技术数据与外形尺寸

XYT系列圆筒形直线感应电动机技术数据与外形尺寸见图5.13-69和表5.13-6、表5.13-7。

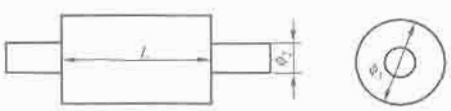


图5.13-69 ZYT系列圆筒形感应电动机外形尺寸

表 5.13-6 XYT 系列三相筒形直线感应电动机的技术数据与外形尺寸

型号	连续运行		15%持续率		外形尺寸 ($L\times\phi_1\times\phi_2$) (mm×mm×mm)
	推力 (N)	电流 (A)	推力 (N)	电流 (A)	
XYTA100-40-2	100	1.6	300	5	200×80×40
XYTA150-50-2	150	2.5	500	8	300×95×50
XYTA200-60-2	200	3.5	650	10	300×110×60
XYTA300-65-2	300	5	1000	15	400×130×65
XYTA500-70-2	500	8	1300	20	500×140×70
XYTA750-85-2	750	11	1500	25	650×160×85
XYTA1000-100-2	1000	15	2000	35	800×170×100

注 线电压 380V，频率 50Hz。

表 5.13-7 XYT 系列单相筒形直线感应电动机的技术数据与外形尺寸

型号	15%持续率		外形尺寸 ($L\times\phi_1\times\phi_2$) (mm×mm×mm)	电容量 (μF)
	推力 (N)	电流 (A)		
XYTB10-12-2	10	1	60×50×12	8
XYTB15-14-2	15	1.25	65×55×14	11
XYTB20-14-2	20	2	65×60×14	15
XYTB30-16-2	30	2.5	100×65×16	20
XYTB50-20-2	50	3.5	130×80×20	25

注 线电压 220V，频率 50Hz。

12.2 部分直线同步电动机的主要技术数据

12.2.1 LMCF 无铁心直线同步电动机

无铁心直线同步电动机用于长定子伺服系统应用的场合，由于动子部分只有线圈，因此动子运动平稳，且具有很大的加速度。整个直线同步电动机各部件可以方便地分块拆卸和安装。

（1）无铁心直线同步电动机型号说明

LMCF 无铁心直线同步电动机型号由名称代号、极数、电机宽度代码、行程长度、安装方式及终端方式几部分组成，各代号如图 5.13-70 所示。

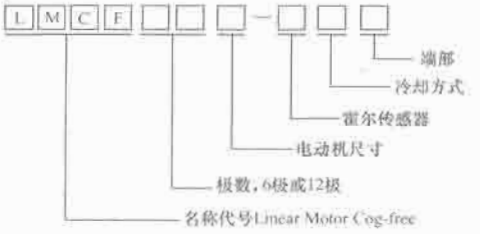


图 5.13-70 无铁心直线同步电动机型号组成

（2）LMCF 无铁心直线同步电动机主要技术数据

LMCF 无铁心直线同步电动机主要技术数据见表 5.13-8。

表 5.13-8 LMCF 系列直线同步电动机技术数据

参数	单位	型号					
		LMCF 02A-HC0	LMCF 02B-HC0	LMCF 04B-HC0	LMCF 02C-HC0	LMCF 04C-HC0	LMCF 06C-HC0
连续推力	N	5.3	13.8	27.8	29	58	87
连续电流	A	1.7	2.1	2.1	1.9	1.9	1.9
10%持续率时的最大推力	N	16	41.8	83.3	86.8	173	260
10%持续率时的最大电流	A	5.1	6.3	6.3	5.7	5.7	5.7
连续功率	W	11	19.6	39.3	24.8	49.5	74.3
线圈长度	mm	87.6	87.6	148.6	87.6	148.6	209.6
传感器材长度	mm	73.3	73.3	134.6	73.3	134.6	195.6
电动机次级重量	kg	0.08	0.11	0.31	0.45	0.45	0.45
固定初级重量	kg/m	3.6	5.5	5.5	8.05	8.05	8.05

参数	单位	型号					
		LMCF 04A-HC0	LMCF 06E-HC0	LMCF 08E-HC0	LMCF 10C-HC0	LMCF 12C-HC0	LMCF 14C-HC0
连续推力	N	124	185	251	314	377	440
连续电流	A	1.6	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
10%持续率时的最大推力	N	372	556	753	942	1132	1321
10%持断率时的最大电流	A	4.7	9.3	9.2	9.2	9.2	9.2
连续功率	W	71.3	106.9	142.1	178.1	214.1	250.1
线圈长度	mm	148.6	209.6	270.5	331.5	392.4	453
传感器材长度	mm	135	196	257	318	378	439
电动机次级重量	kg	0.77	1.12	1.47	1.82	2.17	2.52
固定初级重量	kg/m	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2

12.2.2 LMBL 型有铁心直线同步电动机

LMBL 型有铁心扁平形永磁直线同步电动机结构采用短初级结构，长次级由一条可任意加长的铁轭和交替安置的永磁磁极组成。铁轭上磁极在安放时沿行进方向斜过一个槽的位置。采用斜磁极的效果与旋转电动机中采用斜槽的效果相同，其目的是为了减少齿槽效应引起的吸引力。

（1）LMBL 有铁心扁平形永磁直线同步电动机型号说明

带铁心直线电动机有多种系列和规格，根据用户的不同需要可提供各种规格的电机产品。它的分类号码由名称代号、极数、电机宽度代码、行程长度、安装方式及终端方式几部分组成，各代号的意义如图 5.13-71 所示。

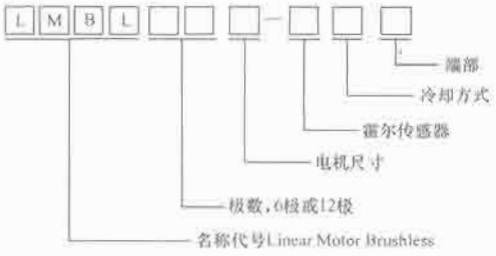


图 5.13-71 LMBL 有铁心扁平形永磁直线同步电动机型号组成

(2) 有铁心直线同步电动机主要技术数据　　有铁心直线同步电动机主要技术数据见表 5.13-9。

表 5.13-9　　有铁心直线同步电动机主要技术数据

参数	单位	型号					
		LMBL-02A-HC0	LMBL-04A-HC0	LMBL-06A-HC0	LMBL-06B-HC0	LMBL-08A-HC0	LMBL-08B-HC0
连续力	N	44.5	66.8	89	133.4	133.4	200
连续电流	A	1.0	1.5	1.7	3.6	2.6	3.3
10%持续率时的最大推力	N	133.5	200.3	267	400	400	600
10%持续率时的最大电流	A	3	4.8	5.1	10.8	7.8	16.5
连续功率	W	27	54	57	86	110	165
动子长度	mm	116	161	207	207	253	253
极对数		2	4	6	6	8	8
电动机次级重量	kg	0.91	1.14	1.7	2.02	2.2	2.7
固定初级重量	kg/m	4.8	4.8	4.8	7.2	4.8	7.2

参数	单位	型号					
		LMBL-10A-HC0	LMBL-10B-HC0	LMBL-12A-HC0	LMBL-12B-HC0	LMBL-14A-HC0	LMBL-14B-HC0
连续力	N	177.9	270	222	330	267	400
连续电流	A	3.3	6.9	4.5	7.6	4.2	6.0
10%持续率时的最大推力	N	533	800	667	1000	800	1200
10%持续率时的最大电流	A	9.9	20.8	13.5	22.7	12.5	18
连续功率	W	139	209	122	183	140	210
极对数	—	10	10	12	12	14	14
动子长度	mm	299	299	345	345	390	390
电动机次级重量	kg	2.5	3.37	2.9	3.98	3.5	4.6
固定初级重量	kg/m	4.8	7.2	4.8	7.2	4.8	7.2

第 14 章　有限转角电动机

1　概述

有限转角运动是在自动控制和传动系统中经常遇到的一种运动形式。为了实现这种形式的运动，通常采用两种方法，一种是利用旋转电动机加上一套偏心轮或凸轮等传动机构，将旋转运动转换为有限转角运动；另一种方法是利用有限转角电动机。由于后者较前者不仅具有结构简单、易控制、精度高、噪声低、寿命长和运行可靠等优点，而且还能更好地执行驱动、定位控制和光学扫描等任务。因此，从 20 世纪 70 年代以来，有限转角电动机逐步取代有限转角传动机构，已在陀螺仪、航空伺服阀、舵机、卫星天线、目标的搜索和跟踪以及红外或激光成像系统中得到应用。随着应用范围日益扩大，对它的品种要求越来越多，性能要求越来越高。因此，今后在提高现有电动机性能及改善控制的同时，还需探索新原理、新结构，增加新品种和新型控制方法。此外，还需结合电动机的运动特点，进一步探讨电动机的理论、最优设计方法和测试技术。

2　分类

有限转角电动机是将电气信号转换成一定角度内角位移的电动机，也就是说在电动机的定子绕组输入控制信号时，它的转子就会在一定角度范围内转动。根据控制信号是直流还是交流，有限转角电动机可分为直流有限转角电动机和交流有限转角电动机。

直流有限转角电动机是当定子绕组通以直流电时，转子在一定角度范围内转动，这种电动机通常作为力矩电动机使用，因此又称为有限转角力矩电动机。

交流有限转角电动机是当它的定子绕组通以交流电时，转子在一定角度范围内围绕某一特定位置振荡。由于这种振荡运动类似于钟表的摆动，因此又称为有限转角摆动电动机，简称摆动电动机。

3　有限转角力矩电动机

3.1　基本工作原理和结构

有刷直流电动机的工作原理和结构是众所周知的：为了使电枢连续旋转必须采用换向器，才能使处于某一磁极下的电枢绕组的电流方向保持不变，使电磁转矩的方向保持不变。如果在一对极的情况下，电枢转动的范围不超过 180°时，就可以不用换向器，电枢绕组也只要具有一定的宽度即可，其引出线则可采用柔软导线。也就是说，当定子绕组通电而产生磁场时，电枢绕组在磁场中受力产生电磁转矩，该转矩使转子带动负载克服由返回弹簧（如盘簧）和摩擦等产生的阻尼转矩从零位转动到某一角度并停顿下来，该角度与电流、磁通密度、负载以及阻尼转矩有关，但最大转角不能超过 ±90°（电角度）；当定子绕组断电时，转子依靠返回弹簧的转矩带动负载克服摩擦等阻尼转矩返回到零位。若通以反向电流，则转子会按上述起动和返回过程反向运动。正是根据这一原理，可做成各种不同结构型式的有限转角力矩电动机。

按励磁方式的不同，有限转角力矩电动机可以分为永磁式和电动式两类；按运动部件的不同，又可分为动铁式和动圈式两类。

图 5.14-1（a）为环形定子永磁式有限转角力矩电动机，其定子为一环形导磁体，若为一对极时，其上均匀地绕有两个对称的绕组，两者反向串联。转子为带转轴的永磁体，永磁体可以制成整体式，也可以做成瓦片形，镶嵌在导磁转子中。这种结构适合于矫顽力高的稀土永磁材料或铁氧体永磁材料。采用铝镍钴永磁材料时，加上用软磁材料做的极靴，适合转角大的情况。永磁式有限转角力矩电动机是载流定子绕组在永磁体磁场中受力而产生电磁转矩的。其优点是单位转矩所需的功率较小，因为这种电动机的工作磁通是由永磁体产生的。电磁转矩与控制绕组所加电流之间近似为线性关系，而转矩的方向则随控制绕组中直流电流的方向而改变。环形定子永磁式有限转角力矩电动机的结构如图 5.14-2 所示。

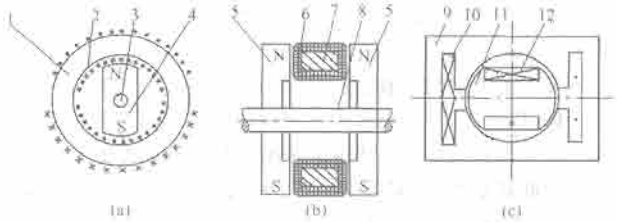


图 5.14-1　有限转角力矩电动机的典型结构型式
（a）环形定子永磁式；（b）端面型永磁式；（c）电动式
1—环形定子；2、10—定子绕组；3、8—转轴；4—永磁转子；5—永磁体；6—环形绕组；7—环形导磁体；9—定子；11—转子；12—转子绕组

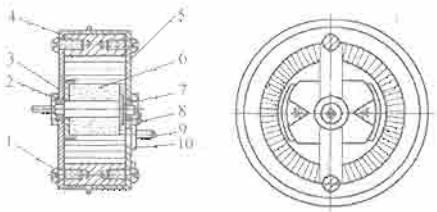


图 5.14-2　环形定子永磁式有限转角力矩电动机
1—螺钉；2—轴承；3—端盖；4—定子组件；5—机壳；6—转子组件；7—调整垫片；8—螺钉；9—接线板；10—绝缘套

图 5.14-1（b）为端面永磁式有限转角力矩电动机，其控制绕组是一个环形线圈，均匀地绕在一个环形导磁体上，每一匝有两个有效圈边，其气隙为轴向气隙。这种结构型式可做成轴向长度较短的扁平型电动机。

图 5.14-1（c）为电动式有限转角力矩电动机，它是由两个载流绕组相互作用而产生转矩的，故又称为双励磁型有限转角力矩电动机。因为靠通电励磁，所以其单位转矩所需功率较大。但在大型直接驱动装置中，却常用它作为执行元件，其原因是目前永磁材料还较贵。该电动机的定子绕组集中嵌在两个槽中，而转子则采用软磁材料做成的凸极转子，其上绕有绕组。这种型式的有限转角力矩电动机的转角工作

范围较大，一对极时接近±90°。当改变所供直流电的极性时，其转矩也改变方向，转矩与电流基本上呈线性关系。

动铁式有限转角力矩电动机的运动部件为永磁体或是带绕组的铁心，因此转子惯量和电动机的电气时间常数都较大，不能满足某些控制系统的要求。动圈式有限转角力矩电动机的运动部件为控制绕组，该绕组绕在由非磁性材料做成的骨架上。转子惯量和电动机的电气时间常数都较小，但其气隙较大。

上述各类结构都有自己的特点，究竟采用何种结构型式，要根据具体使用要求综合考虑。一般来说，无论采用上述哪种结构型式，它与普通有刷直流力矩电动机相比时，都具有如下优点：没有齿槽、没有电刷和换向器之间的滑动接触，从而消除了由于齿槽效应而引起的转矩脉动及由于机械换向而引起的火花干扰和摩擦转矩，消除了因电刷的接触压降所造成的低速不灵敏区，从而提高了电动机的可靠性和寿命。

3.2 工作特性

电动机的转矩 T 与极对数 p、气隙磁通密度 B_δ 分布规律、控制绕组的平均直径 D_a、有效长度 l_m、匝数 N 以及电流 I 有关，在气隙磁通密度均匀分布，并且不考虑定子磁动势所引起的电枢反应的理想情况下，电动机的转矩为

$$T = pINl_mD_aB_\delta \qquad (5.14\text{-}1)$$

利用上式就可以分析、计算电动机的工作特性。

3.2.1 转矩—转角特性

转矩—转角特性是指在控制绕组电流恒定时转矩与转角的关系，即 $T = f(\theta)$。在不考虑定子磁动势所引起的电枢反应的情况下，可以认为在一定转角范围内气隙磁通密度的分布是均匀的，因此转矩也就与转角无关。利用式（5.14-1）计算出的理想转矩—转角特性示于图 5.14-3（a）。实际上电动机的电枢反应是不能忽视的，它对电动机的转矩—转角特性会产生影响，如转子采用矫顽力小的铝镍钴永磁材料，而且电枢绕组安匝数又大的电动机影响更大。此外，绕组分布不均匀、磁性能不一致等因素都会使其特性受到影响。有极靴的永磁式有限转角力矩电动机的转矩—转角特性如图 5.14-3（b）所示。

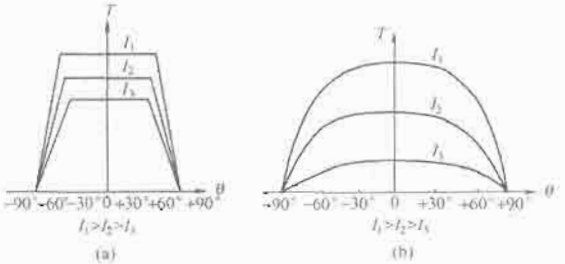


图 5.14-3 转矩—转角特性

（a）理想转矩—转角特性；（b）实际转矩—转角特性

3.2.2 转矩—电流特性

转矩—电流特性是指转角一定时，转矩与电流的关系，用 $T = f(I)$ 表示，图 5.14-4 给出了永磁式有限转角力矩电动机的转矩—电流特性，这种电动机的转矩—电流特性基本上是线性的，这正是伺服系统所要求的。

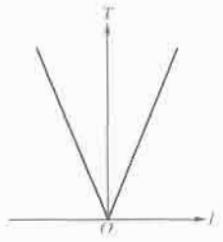


图 5.14-4 转矩—电流特性

3.3 主要参数的选择

有限转角力矩电动机主要参数选择的基本原则是在规定的外形尺寸下，使电动机的输出转矩最大、单位电流所产生的转矩即灵敏度最高；或是在满足规定的技术指标的情况下，外形尺寸尽可能小。下面介绍环形定子永磁式有限转角力矩电动机主要参数选择的原则。

3.3.1 极对数的选择

极对数 p 应根据用户所提出的转角范围来确定。最大转角 θ_{max} 与极对数 p 的关系为

$$\theta_{max} = \pm\frac{180}{2p} \qquad (5.14\text{-}2)$$

式中，θ_{max} 为最大转角，（°）。

上式表明，最大转角 θ_{max} 在一对极时等于±90°，在两对极时为±45°。但实际选择最大转角时，要小于上述数值。这是因为转子处于上述最大转角时，正是其平衡位置，此时电动机的输出转矩值为零。

3.3.2 永磁体宽度的选择

在其他条件相同的情况下，若增加永磁体的宽度，则电动机的有效匝数、最大输出转矩、转矩灵敏度都要相应增大，然而永磁体是不能宽到最大转角时跨接两个不同极性绕组的，否则会使一部分转矩相互抵消。所以，永磁体最大宽度所对应的圆心角应为

$$\alpha_{max} = 2\left(\frac{180}{2p} - \theta_{max}\right) + \alpha_1 \qquad (5.14\text{-}3)$$

式中，α_{max} 和 α_1 为角度，（°）。

α_1 为一角度值，由于定子铁心要与带轴承的支架或端盖固定连接，因此它有一段宽度不能缠绕定子绕组，α_1 的大小就与该段的宽度有关。对于要求转角范围内转矩恒定的电动机来说，α_1 值可在5°～10°之间选择。

3.3.3 气隙长度的选择

这种电动机的定子铁心无槽，其控制绕组处于气隙中，因此，气隙大小不仅影响永磁材料的工作点，而且还对绕组参数有所影响。若采用稀土永磁材料，矫顽力高，可选用较大的气隙，其长度可至 2.5～5mm。

3.3.4 控制绕组的型式及有效长度 l_m 的选择

若电源为双极性直流电源，则可选用一套绕组；若为单极性，则需两套绕组。而控制绕组的有效长度可按下式初步确定

$$l_m = \frac{4T_{max}k\rho\lambda J}{P_1B_\delta} \qquad (5.14\text{-}4)$$

式中，$k \approx l_a/(2l_{ft})$；ρ、l_a、J 分别表示控制绕组的电阻率、平均匝长和电流密度。k 的大小与电动机的型式有关，大约在 1.2～2.0 之间（较小数值对应于细长型，较大数值对应于扁平型）。λ 是绕组的有效长度与其平均直径之比，对大多数电动机来说可在 0.2～1.0 之间选取。若增大 λ 则使绕组的非有效部分的长度、永磁体端部的漏磁以及转子的转动惯量减小。若电动机的外形尺寸给定，λ 值也就相应定了。在一定转角范围内，气隙磁通密度 B_δ 的分布可以认为是均匀的。当最大转矩 T_{max} 和输入功率 P_1 给定后，只要适当地选择 B_δ、J、k、λ 值，根据上述公式进行计算，即可初步确定绕组和导磁体的主要尺寸。

3.3.5　返回弹簧的选择

从电动机起动到返回的一个周期来看，当电动机结构确定后，压簧阻力矩和静摩擦力矩在整个工作过程中基本不变。而作为返回弹簧的盘簧则不同，它在起动和返回状态中，所起的作用是不一样的，而且是变量。电动机起动时希望盘簧转矩越小越好，也就是盘簧越松越好，以便电动机可靠地起动；但电动机返回时却希望盘簧转矩越大越好，即希望盘簧越紧越好，使电动机转子能在规定的时间内返回零位，这两者本身是相互制约的。

尽管盘簧的松紧能调整电动机的技术指标，但当盘簧无法兼顾各项指标时，增加电磁转矩无疑是非常有效的。因为当电磁转矩设计得足够大时，电动机有能力克服大的盘簧转矩，这样盘簧可以调整得紧一些，以满足电动机返回时间的要求。当然选择合理的盘簧结构、减小压簧及静摩擦等力矩也是不可忽视的。

3.4　控制

在位置控制系统中，有限转角力矩电动机与盘簧之类的返回弹簧组成简单的开环系统，开环系统结构虽然简单，但输出位置的稳定性取决于弹簧的刚度，因此精度不高。为了提高控制精度，常采用闭环负反馈系统，将检测装置的输出值与给定值进行比较，得到偏差，然后由校正装置（控制器）按偏差进行某种控制运算，最后由执行机构将控制量作用于被控对象，以消除偏差。如果上述系统中的比较器和控制器用计算机来代替，就组成了计算机控制系统，可实现全数字控制。有限转角力矩电动机的闭环控制系统一般由角度位置传感器、控制器及电动机本体组成。角度位置传感器可采用旋转变压器或光电编码器，可以实时检测出电动机转子转过的角度（位置），并由此计算出相应的电动机速度，用作位置及速度的双闭环控制。控制器可采用全硬件电路也可以采用单片机软硬件并用以达到所要求的精度。

4　有限转角摆动电动机

4.1　基本工作原理

在理想情况下，当定子绕组不通电时，仅由永磁体产生的磁通路径如图 5.14-5（a）中实线所示。此时，转子处于稳定平衡状态，并停在磁路中磁导最大的位置，也就是永磁体的磁场中心轴线与定子窄槽口中心线相重合的位置，即稳定平衡位置，亦称转子零位。当定子绕组通电时，由绕组通电励磁所产生的磁通路径如图 5.14-5（b）中虚线所示。从图中可以看出：绕组通电励磁所产生的磁通在定子齿 b 和齿 d 及其气隙中的磁通量增多，即增磁；而在定子齿 a 和齿 c 及其气隙中的磁通量减少，即减磁。由于两对定子齿下气隙中的磁通量不等，从而产生切向磁拉力，或者说产生转矩，迫使转子朝着磁通量增多的方向转去。当定子绕组通电方向相反时，由绕组通电励磁所产生的磁通路径方向也相反，因此，定子各齿及其气隙中原先增磁的变成减磁；而原先减磁的变成增磁，使得转子朝着与前次相反的方向转去，如图 5.14-5（c）所示。如此继续，定子绕组通电方向变换一次，转子的转动方向也相应地变换一次。因此，当定子绕组通电方向连续地交替变化即通交流电时，转子就会围绕其稳定平衡位置来回转动，即摆动，如图 5.14-5（d）所示。其摆动频率与通电电流的频率相同，而摆动角度则取决于通电电流的大小、永磁体的磁场强度以及电动机转动部分的转动惯量等因素，但最大摆动角度不会超过±90°。

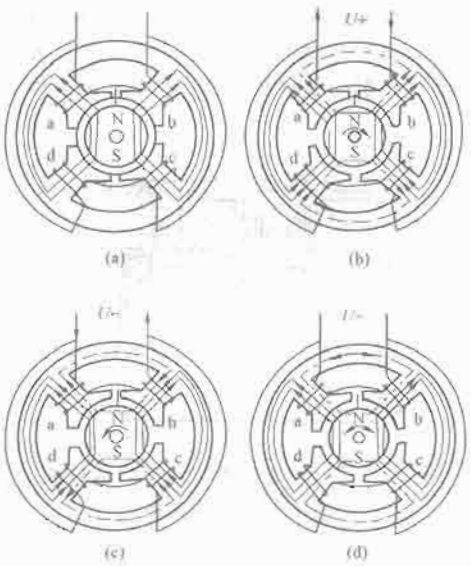


图 5.14-5　有限转角摆动电动机原理图

4.2　结构

根据上述工作原理，可做成永磁式摆动电动机和永磁感应子式摆动电动机。永磁式摆动电动机的定子铁心是由冲有四个齿的硅钢片叠成，窄槽口和宽槽口相间分布。线圈嵌套在定子齿上，各线圈彼此连接组成一个绕组，其连接方式是使它们在通电励磁时形成两个磁极，即由齿 a 和齿 d 形成一个磁极，齿 b 和齿 c 形成另一个磁极，如图 5.14-5（a）所示。转子由永磁体和转轴构成，永磁体内可以有轴孔也可以无轴孔。有轴孔的永磁体转子其转轴是压入永磁体孔内的；无轴孔的永磁体转子即实心永磁体转子，其转轴和永磁体端面可用环氧或胶粘成一体，为了可靠，永磁体端面还可做成止口结构或燕尾结构或直槽结构。尽管实心永磁体转子比有轴孔的永磁体转子加工工艺复杂，但其磁性能却比较好。

永磁感应子式摆动电动机的定子铁心由冲有四个齿的硅钢片叠成，窄槽口和宽槽口相间分布并在宽槽口中间将冲片分成两半，中间夹有永磁体，从而形成一个整体定子铁心。该铁心可以是圆形，也可以是方形，前者采用套齿式线圈，后者采用套轭式线圈如图 5.14-6 所示。各线圈彼此连接后组成一个定子绕组，其连接方式是使它们在通电励磁时形成两个磁极，如图 5.14-6（a）所示，即由齿 a 和齿 d 形成一个磁极，齿 b 和齿 c 形成另一个磁极。转子为凸极形的电工纯铁或硅钢片叠制而成。为了使绕组不通电时，转子能可靠地停止在稳定平衡位置，即有定位能力，有的电动机还需利用装在转子轴上的扭力棒的扭矩来实现。

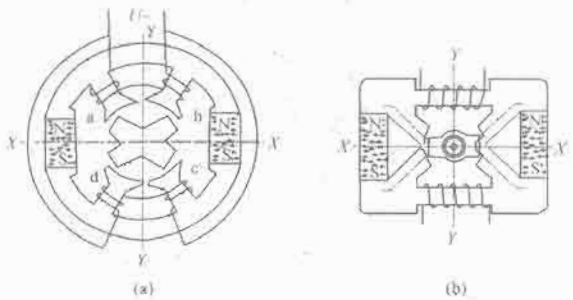


图 5.14-6　永磁感应子式摆动电动机原理图
（a）套齿式绕组；（b）套轭式绕组

如果摆动电动机采用闭环控制，那么在它的轴上还需要安装一个位置传感器，如差动式电容传感器、电感

式传感器、光电编码器等。为了使摆动电动机结构紧凑，传感器与电动机本体通常装在同一机壳内，从而形成带有位置传感器的摆动电动机，图 5.14-7 为这种电动机的结构图。

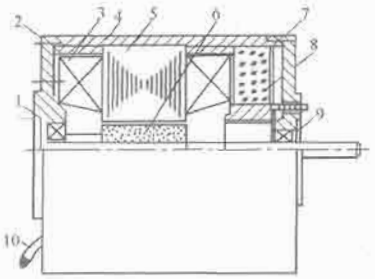


图 5.14-7 带有位置传感器的永磁式摆动电动机结构图

1—轴承盖；2—端盖；3—绕组；4—机壳；5—定子铁心；6—转子；7—端盖；8—电容传感器；9—轴承盖；10—引出线

4.3 工作特性

4.3.1 摆动角度的计算

摆动电动机的工作特性与其摆动角度密切相关，而决定摆动角度的主要因素是转矩。摆动电动机的计算模型如图 5.14-8 所示。摆动电动机的转矩由电磁转矩 T_{em} 和定位转矩 T_m 组成，电磁转矩是由载流绕组和永磁体相互作用而产生的转矩，它是驱动电动机与控制信号同步摆动的转矩。定位转矩是仅在永磁体励磁的情况下，因定子齿槽而引起的气隙磁导随转角变化所产生的转矩。如果转子为凸极型，还要考虑在定子绕组通电励磁情况下，因转子凸极而引起的气隙磁导随转角变化所产生的转矩。当转子受外界干扰，例如外加转矩使其偏离稳定平衡位置，在除去外界干扰后，定位转矩能使转子返回并停在稳定平衡位置。一般来讲电动机的转矩是转角的周期性函数，其函数变化曲线比较复杂，但为了易于分析计算，且又能反映电动机特性的主要方面，通常选取对曲线起主要作用的基波分量。考虑到电动机一般带动惯性负载在稳定平衡位置即零点（$\theta=0$）附近作小角度的摆动，这样在正弦电压 U 的控制下，电动机的摆角为

$$\theta=\theta_m\sin(\omega t-\varphi_\theta) \tag{5.14-5}$$

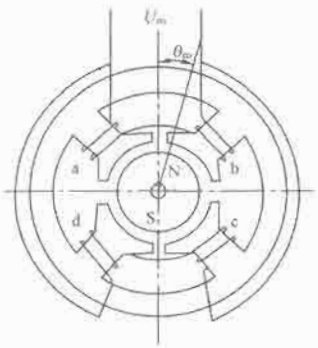


图 5.14-8 摆动电动机计算模型

摆角的幅值及其相位差分别为

$$\theta_m=\frac{K_uU_m}{\sqrt{\left[1-\alpha\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2+\left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)-\tau\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3\right]^2}} \tag{5.14-6}$$

$$\varphi_\theta=\arctan\frac{2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)-\tau\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3}{1-\alpha\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \tag{5.14-7}$$

式中，$\omega_n=\sqrt{\frac{K_m}{J}}$；$K_u=\frac{K_t}{JR\omega_n^2}$；$\tau=\frac{\omega_nL}{R}$；$\alpha=1+\frac{DL}{JR}$；$\xi=\frac{1}{2\omega_n}\left(\frac{D}{J}+\frac{K_eK_t}{JR}+\frac{K_mL}{JR}\right)$；$K_e=K_t=\left(\frac{dT_{em}}{di}\right)_{\theta=0}$；$K_m=\left(\frac{dT_m}{d\theta}\right)_{\theta=0}$

式中，R 和 L 分别表示定子绕组的电阻和电感；J 表示电动机转动部分，即转子和负载的转动惯量；ξ 表示阻尼系数；D 表示摩擦转矩系数；T_{em}、K_t 和 K_e 分别表示电磁转矩幅值、电磁转矩常数和反电动势常数；T_m 和 K_m 分别表示定位转矩幅值和磁等效刚度。

电动机的电流为

$$I=I_m\sin(\omega t-\varphi_1) \tag{5.14-8}$$

电流的幅值及相位差分别为

$$I_m=\sqrt{\frac{(U_m-K_e\omega\theta_m\sin\varphi_\theta)^2+(K_e\omega\theta_m+\cos\varphi_\theta)^2}{R^2+(\omega L)^2}} \tag{5.14-9}$$

$$\varphi_1=\arctan\frac{K_e\omega\theta_m\cos\varphi_\theta}{U_m-K_e\omega\theta_m\sin\varphi_\theta}-\arctan\frac{\omega L}{R} \tag{5.14-10}$$

由 $\frac{d\theta_m}{d\omega}=0$，可求得电动机的谐振频率

$$\omega=\omega_r=\frac{\omega_n}{\tau}\sqrt{\frac{(4\xi\tau-\alpha^2)+\sqrt{(\alpha^2+4\xi\tau)^2-3\tau^2(4\xi^2-2\alpha)}}{3}} \tag{5.14-11}$$

利用上式就可以分析、计算电动机的工作特性。

4.3.2 摆角—电流（电压）特性

当电动机的摆角很小时，电动机的 K_m、K_e 可视为与摆角无关的常数，故摆角随电流（电压）大致呈线性变化。然而当电动机的摆角很大时，K_m、K_e 就不可能视为与摆角无关的常数，而是随摆角呈非线性变化的函数，因而摆角随电流（电压）呈非线性变化。图 5.14-9 为电动机的摆角与电流（电压）的关系。

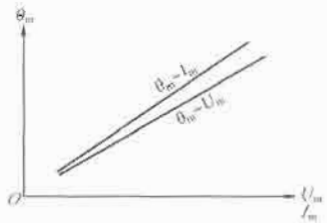


图 5.14-9 摆角与电流（电压）的关系

4.3.3 摆角—频率特性

在正弦信号控制下，电动机摆角随频率变化的特性称为摆角—频率特性。在电压保持一定的情况下，若阻尼系数 ξ 很大，则摆角随频率的增加而减小，如图 5.14-10（a）所示。反之，若阻尼系数 ξ 很小，摆角最初随频率的增加而增大，到达谐振时，其摆角最大，然后随频率的增加而减小，如图 5.14-10（b）所示。

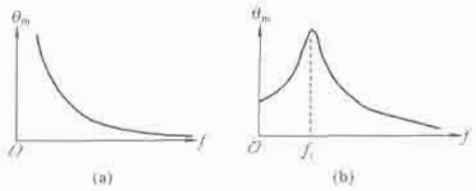


图 5.14-10　摆角与频率的关系
（a）阻尼系数 ξ 很大；（b）阻尼系数 ξ 很小

4.3.4　摆角—惯量特性

它是摆角与转动惯量的关系，如图 5.14-11 所示。摆角随电动机转动部分惯量的增加而减小。这是由于转动惯量的增加导致自然角频率值减小，若保持摆动频率不变，则其角频率相对值增大。因此，在其他参数不变的情况下，为了增加摆动角度，应尽可能地减小电动机转动部分的惯量。

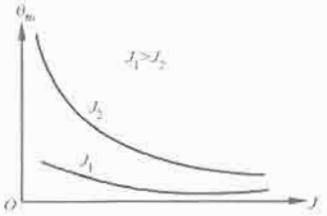


图 5.14-11　摆角与转动惯量的关系

4.3.5　摆角—时间特性

摆角—时间特性亦称为电动机的运动特性，摆角—时间特性曲线显然是时间的周期性函数。一般来讲，电动机采用正弦波信号控制时，其摆角大致能跟随信号呈正弦形变化。但非正弦波信号控制时，其摆角不能紧跟信号波形变化，如图 5.14-12（a）所示。为了使摆角大致能紧跟非正弦波的变化，就需要采用闭环控制，例如图 5.14-12（b）给出了闭环控制下的三角波信号输入时的摆角—时间特性曲线。

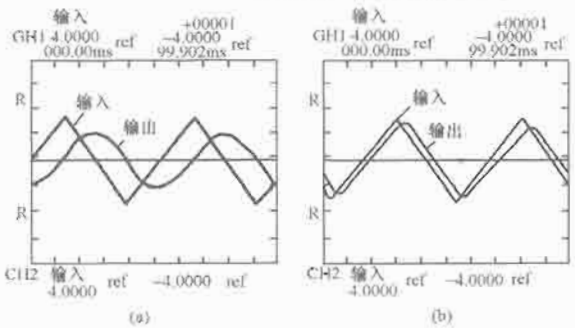


图 5.14-12　三角波信号控制时的摆角—时间特性曲线
（a）开环控制；（b）闭环控制

4.4　参数的选择

摆动电动机参数选择的基本原则是在规定的外形尺寸下，使电动机的摆动角度大、摆动频率高、定位性能好并满足其他技术指标；或是在满足规定技术指标的情况下，外形尺寸小、工艺简单、运行稳定、定位可靠。下面介绍摆动电动机主要参数选择的原则。

4.4.1　窄槽口

在定子铁心尺寸已定的情况下，窄槽口越宽，线圈嵌入越容易。然而，过宽的窄槽口会因定子极弧（齿顶宽度）所占圆弧角过小，使永磁体产生并匝链于定子绕组的磁通量减少。尽管它对定位转矩影响不大，但会使电磁转矩数值显著地减小，从而导致摆角减小。反之，窄槽口过小，窄槽口之间漏磁增大，使得电感增大。在控制电压已定的情况下，通过绕组中的电流就会减小，从而导致电磁转矩相应地减小，摆角也减小，但定位转矩变化不大。应从兼顾嵌线容易，电磁转矩大的原则，选择合适的窄槽口宽度。

4.4.2　槽口比

它是指宽槽口宽度与窄槽口宽度之比值。在窄槽口宽度已定的情况下，槽口比越大，意味着宽槽口越大。过大的宽槽口会因过小的极弧致使磁通量减少而导致电磁转矩减小；气隙磁导的二次谐波分量增大而导致定位转矩增大，使得转子的定位性能增强，但摆动角度却减小。反之，槽口比过小会使磁通量增多而导致电磁转矩增大；气隙磁导的二次谐波分量减小而导致定位转矩减小，定位性能减弱，但摆动角度会增大。因此，应在满足电动机可靠定位并能获得较大摆角的前提下，选择合适的槽口比值。通常，该值可选择在 2.5 左右。

4.4.3　转子

在电磁参数已定的情况下，为了使电动机具有较高的摆动频率和较大的摆动角度，必须减小电动机转动部分即转子和负载的转动惯量，由于负载的转动惯量是由用户决定的，这样只有减小转子的转动惯量。该惯量与其直径的四次方成正比，因此就要选择尽可能小的转子直径。为了使电动机在较小直径条件下获得较高的磁场，除需要采用高矫顽力和高磁能积的永磁材料作为永磁体外，对于永磁式摆动电动机来讲，最好采用实心永磁转子结构。

4.5　控制

为了使摆动电动机的输出摆角跟随输入信号变化，通常采用闭环控制，以改善系统的频率响应特性，提高电动机的瞬态响应速度，从而减小过渡过程时间；闭环控制可选择不同的补偿器来比较灵活地改变系统参数，以便得到较好的动态特性。此外，它还可以提高系统的抗干扰能力，并降低系统对其使用环境和条件的要求。

摆动电动机的闭环控制系统由电动机、位置传感器及其检测电路、驱动电路、补偿器及信号发生器组成。系统工作时，由传感器输出的位置信号经补偿电路补偿后，与输入信号进行比较，产生的误差信号经补偿放大后驱动电动机运动。由于现代测控技术的发展，采用专用模块、单片机软硬件并用，实现了全数字控制并提高了控制精度。从图 5.14-12（b）中可以看出，采用闭环控制而且系统参数选择合适时，其摆角的输出波形基本上能跟随输入信号波形变化。

5　主要技术指标、技术标准和测试技术

有限转角电动机的运动形式与旋转电动机不同，在结构、性能、控制及应用等方面都有自己的特点，因而具有不同的技术指标和测试技术。表征有限转角电动机性能的主要技术指标是转角、转矩、频率和线性误差，下面分别讨论这些性能指标及测试方法。

5.1　转角与转角—时间特性的测量

转角是指有限转角电动机的角位移量，它反映了有限转角电动机的运动范围，是一个基本技术指标。有限转角力矩电动机的运动范围是从零位（转角为零时的转子位置）到在规定的技术要求下转子能正常工作的最大转角范围，用正负角度表示；摆动电动机的运动范围是从零位（摆动电动机不加励磁时的转子位置）到最大摆角，即摆角的幅值，常用

峰-峰值来表示。转角随时间变化的特性表示电动机的运动特性，是有限转角电动机的基本特性。它不仅与自身的机电参数和负载有关，还与控制信号的形式有关，通常是非线性的，但实际应用中却常常要求线性特性。

如前所述，有限转角电动机的转角与转角—时间特性可由理论计算求得，也可用试验方法获得。试验方法很多，但最简单、最直观的常用方法是光反射法，这种方法主要用于摆动电动机摆角的测量，具体做法是在被测电动机的轴伸上安放一片平面反射镜，再由激光器发出一束激光射到平面镜上时，即被反射到投影面（屏幕）上形成一个光点像，其位置可用固定在投影面上的标尺来读取。首先记下电动机不通电时的光点位置，即零位。当电动机转动一个角度时，射到平面镜的光束入射角随之改变，从而使反射到投影面上的光点位置发生偏移。当电动机通以交流电而摆动时，反射到投影面上的激光光点呈现为一连续的亮线，又称扫描线。用扫描线两端的距离，就可以计算出电动机的摆角。利用动态波形摄影仪器如示波照相机可记录到电动机的转角—时间特性。示波照相机记录光扫描线的胶片，若垂直于扫描线的方向匀速移动，边拍摄边卷片，就可以记录下不同瞬间反射光点的位置，从而得到电动机的摆角与时间的关系，即运动特性。

5.2 转矩与转矩—转角特性的测量

转矩是反映电动机拖动负载的能力，决定电动机的运动特性及定位性能的一个重要指标。随着使用场合不同，对电动机转矩—转角特性的要求也不相同。例如，对于伺服控制用的有限转角力矩电动机，一般要求较大的起动转矩、额定转矩以及转矩与转角无关的特性曲线；对于光学扫描用的摆动电动机，除要求合适的电磁转矩及定位转矩外还要求转矩与转角的关系曲线近似为正弦形。

转矩与转矩—转角特性的测量方法很多，下面介绍一种最简单而且容易实现的线轮法，这种方法主要用于有限转角力矩电动机转角的测量。该方法就是在装于电动机轴上的圆盘（测量盘）上悬挂砝码，利用电动机的静态转矩与所挂砝码产生的外加转矩平衡的原理来测得电动机的转矩。转角用下面的方法测量：电动机按规定安装，电动机不通电，按零位标志将电动机调至零位，用固定在角分度装置台面上的自准直仪对准镜面指零，从角分度装置读取电动机零位，然后通电并加载，按电动机转动方向转动角分度装置，使自准直仪跟踪指零。读取角分度装置转过的角度，这样就可以绘制成转矩与转角的关系曲线，即转矩—转角特性。

5.3 摆动频率与摆角—频率特性的测量

摆动频率是指电动机转子与控制信号同步运行的频率，在同步运行过程中，信号每变化一个周期，电动机转子完成一次摆动运动，因此摆动频率也就是控制信号的频率。在正弦信号控制下，电动机的摆角随频率变化的曲线就是摆角—频率特性。该特性可用变频法测得。测试时在保持电动机输入信号幅值不变的情况下，改变其频率，利用上述光反射法就可以测得与频率相对应的摆角，并绘出其摆角—频率特性曲线，该曲线上摆角的最大值所对应的频率是谐振频率。

5.4 线性误差和重复性误差及其测量

线性误差和重复性误差是衡量摆动电动机运动稳定性的一项指标，也是光学跟踪、扫描成像系统对摆动电动机的一项技术要求。摆动电动机的线性误差和重复性误差可利用上述光点反射法所测出的电动机转角—时间特性曲线，再按下述方法计算求得。

1）摆动特性线性误差：它是判断电动机转角—时间特性线性程度的一个指标。在摆动电动机的最大摆角范围内，理想电动机的转角—时间特性是线性的，而实际电动机的转角—时间特性是非线性的。摆动特性线性误差为摆角的实际值与对应的理论值之差对最大摆角之比，以百分数表示。

2）位置传感器线性误差：对带有位置传感器的摆动电动机来说，还存在位置传感器线性误差，它是指在摆动电动机最大摆角范围内，位置传感器的输出电压的实际值与对应的理论值之间的误差，用下式计算

$$\delta_l = \frac{U'_\theta - U_\theta}{U_{\theta\max}} \times 100\% \qquad (5.14\text{-}12)$$

式中，δ_l 为位置传感器线性误差；U'_θ 为各位置的实测输出电压，V；$U_{\theta\max}$ 为最大摆角时的实测输出电压，V；U_θ 为以 $U_{\theta\max}$ 为最大理论输出电压时，对应各位置的理论输出电压，V。

3）零位重复误差：理想电动机是不出现零位重复误差的，而实际电动机由于某些干扰因素，有可能出现零位重复误差。零位重复误差是指摆动电动机不加励磁时的转子位置与规定的励磁停止后的转子位置之差。

4）重复性误差：在电动机周期性摆动期间，任何两个摆动周期内的转角—时间特性应该是完全重复一致的，如果由于某种原因出现一个周期内的转角—时间特性与另一个周期内的转角—时间特性曲线不一致，即两曲线之间出现摆角误差。重复性误差为摆角误差最大值对最大摆角之比，以百分数表示。

由于有限转角电动机的应用领域比较广泛，使用环境条件各不相同，系统对它的要求又不一致。因此，除考虑上述基本技术指标外，还需要考虑用户对它提出的某些专用技术指标。如起动时间（定子绕组通电，转子带动负载从零位转到额定位置所用的时间）、恢复时间（定子绕组断电，转子带动负载从额定位置返回到零位所用的时间）、转矩波动系数［用线轮法测定正反向额定电流下的转矩及转角，绘出有限转角力矩电动机的 $T = f(\theta)$ 曲线，转矩波动系数为曲线中转矩最大值和最小值之差与转矩最大值和最小值之和相除之商的百分数］、抗干扰性（在正常条件下，由于电源电压波动或外界力矩干扰，电动机仍能正常工作的能力）、输出电压斜率（摆动电动机内的位置传感器在规定的条件下，单位角度的输出电压）以及环境温度、湿度等。

5.5 相关技术标准

有限转角电动机所采用的主要技术标准如下：

1）GB/T 7346—1998《控制电机基本外形结构型式》

2）GJB 271A—1999《控制电机包装规范》

3）GJB 361A—1997《控制电机通用规范》

4）GJB 2822—1997《有限转角力矩电动机通用规范》

5）GJB 1937—1994《摆动电动机通用规范》

6 工艺特点

有限转角电动机的冲片、绕组、转子部件、机壳、端盖等制造工艺与一般旋转电动机的制造工艺相同，但弹簧的制造工艺和用于检测的波段开关有自身特点，下面分别予以阐述。

在位置控制系统中，有限转角力矩电动机需要与返回弹簧组成简单的开环系统，系统要求盘簧的拉力要一致，盘簧的两个侧平面与其他结构件的摩擦力会影响其拉力。采用设

计合理的工艺装置，并从绕制、成型和热处理强化等环节逐一保证其外形尺寸的一致性和材料内部结构的均匀性，以满足整机的质量目标要求。

在有限转角力矩电动机中，为检测转子位置，需要一套机械控制电路，即开关盘和开关组件，波段开关齐平电路是开关盘组件的关键技术。它的动静接触表面质量要求高，加工难度很大，可采用铜板镀金后嵌入半固化材料，并予以热定型固化处理。这种方法能保证电路的制作精度及可靠性，使该零件的接触表面质量高，使用寿命长，导电片不易磨损。但该工序加工为一次性成型，无法中间检查或返修，所以操作者在加工过程中要严格遵守专业工艺守则，在特定的工作环境中按规定操作。选好原料，掌握好固化处理工艺。首先，制作高精度生产母版以确保制作精度；其次，做到预压基板无气泡、表面光滑平整、无翻胶、图形无断线、尺寸无变化。建立完善的工艺文件和质量控制文件，确保产品合格率及质量一致性。对成品的检查，要重点检查盘面的表面粗糙度，导电铜片与固化材料之间连接面应平滑过渡，并规定其表面平面度不超过 0.01mm。否则在电机工作过程中极易出现“打火”现象，从而烧坏导电片和接线触头。

7　应用

在一些民用和军用工业装置中，有要求作有限转动或作周期性摆动的机构，若采用有限转角电动机，可避免轮系传动或液压传动的缺点，使装置具有结构简单、工作可靠、噪声低、效率高、易于控制、精度高、动态响应好等优点。因此不仅可用来直接驱动各种阀门、天线、记录仪指针、记录笔，而且还可以在某些要求定位精度高的电气伺服控制系统，如在红外成像、彩色分离器、激光标识、激光雷达、军事瞄准系统、大气监视以及测绘系统等领域中作为执行元件，特别在红外成像系统中的应用最为广泛。下面举几个应用实例予以说明。

（1）在驱动系统中的应用

有限转角力矩电动机已在航空和卫星照相机中作为快门伺服器使用。当绕组未通电时，快门关闭镜头。通电时，电动机带动快门转动一个角度使镜头打开，照相机摄取景物；断电时，快门返回并关闭镜头。这样，利用改变通电和断电的时间，就可以控制照相机摄取景物的时间，它比手控快门准确而且可靠。

（2）在位置控制系统中的应用

有限转角力矩电动机在陀螺装置中应用时，用两个轴线相互垂直的有限转角力矩电动机使陀螺可上下或左右运动，以产生轴的进动或补偿由进动而引起的扰动力矩，保证其相对于可动坐标系统的位置不变。又如在目标位置控制系统中（天线、瞄准器、天文传感器等），有限转角力矩电动机可以使目标由一个位置偏转到另一个位置。它与带有减速器的快速执行电动机的作用相似，但由于没有传动齿轮的间隙和摩擦，提高了系统的精度与可靠性。

（3）在成像系统中的应用

在红外和激光成像系统中，摆动电动机带动镜片摆动，从而实现水平和垂直方向的扫描（行扫和帧扫）。这样，被扫描的整个物体的红外辐射便依次逐点聚焦到红外探测器上，并转换成电信号，经电子信息处理后，在屏幕上显示出物体的热像分布图。

（4）在搜索和跟踪系统中的应用

搜索是在可能出现的空间内寻找目标，跟踪则是需要确定目标的精确位置。红外搜索跟踪就是利用目标（飞机、坦克、导弹等）放射出的强大红外辐射能来寻找和确定目标的精确位置。来自目标的红外辐射能经望远镜和反射镜聚焦到多元探测器线阵上。探测器检出的信号，一部分用以控制摆动电动机来带动扫描镜，实现水平方向的摆动扫描；另一部分则用来驱动伺服电动机以带动反射镜，使其始终对准目标，从而便于在视场中心探测目标。由于它具有宽视场搜索目标，较小视场内高精度跟踪目标的能力，因此在红外和激光制导、侦察以及雷达上得到了应用。

（5）在光盘存储系统中的应用

现代信息处理装置要求存储的信息量越来越大，而光盘存储技术能满足其要求。因为光盘存储器比磁盘存储器的存储信息密度大、成本低、寿命长，并且有频带宽、失真度小、分辨率高等优点，现已得到应用。信息记录在光盘存储器上的大致过程为：被记录的信息（图像、文字、声音等）转换成电信号后调制激光束，激光束通过一个带有电子聚焦线圈的光学臂而聚焦成一个极小的光点，该光点借助光臂内两个反射镜投射到光盘上，光盘则安装在一个由稳速伺服电动机驱动的转台上。摆动电动机带动光臂摆动时，光点沿着光盘作密螺旋运动，从而将信息记录在光盘存储器上。

8　典型产品技术数据

有限转角力矩电动机技术数据见表 5.14-1～表 5.14-3，摆动电动机技术数据见表 5.14-4。

表 5.14-1　有限转角力矩电动机技术数据

电动机型号	40DXJ001	50DXJ001	50DXJ002	J50LXJ
额定电压(V)	27	28	28	±24
电流(A)	≤0.55	≤1.8	≤2.3	1
力矩($\times10^{-3}$N·m)	60	50	60	95
工作转角(°)	30	90	90	±60
外径×长度(mm×mm)	40×27.5	—	—	52×23

表 5.14-2　有限转角力矩电动机技术数据

电动机型号	J15LXJ01	25LXJ01	J32LXJ01	45LXJ01	45LXJ02	55LXJ01	70LXJ02
额定电压 DC(V)	≤6	24	28	15	15	27	28
电流(A)	0.003～0.06	≤0.13	0.35	0.6	0.8	1.3	1.9
起动力矩($\times10^{-3}$N·m)	≥0.1	≥3.4	≥35	40	40	120	120
工作转角(°)	47±5	44±3	80	±30	±5	±25	90～94
外径×长度(mm×mm)	15×41	25×25	32×76	45×39	45×45	55×39	70×55.5

表 5.14-3 有限转角力矩电动机(波导转换器)技术数据

电动机型号	24PH	40PH	40PHX1	40PHX2	40PHX3	55PH01	56PH
额定电压 DC (V)	27	27	27	27	27	27	27
电流 (A)	0.22	0.32	0.35	0.32	0.32	0.5	2.4
起动力矩 ($\times10^{-3}$N·m)	1.2	7	16	7	16	39	80
工作转角 (°)	80	90	90	120	90	90	90
外径×长度 (mm×mm)	24×45.7	40×52	40×53.5	40×53.5	40×53.5	55×60	55×60.5

表 5.14-4 摆动电动机技术数据

电动机型号	45DBY	50DBY	55DBG
额定电压(V)	6	28	15
电流(A)	3×10^{-2}	0.25	0.2
摆动频率(Hz)	50	30	30
负载惯量(kg·m^2)	7×10^{-8}	2×10^{-5}	1×10^{-5}
摆动角度(°)	±6	±5.5	±12
外径×长度(mm×mm)	45×34	50×50	55×60

第 15 章　角位传感电机

1　概述

1.1　分类

角位传感电机是将运动物体的位置信息（角位移、直线位移）转换成电信号，进行角位的指示、变换、传输及解算的一类机电元件，常称为信号电机。角位传感电机种类较多，适用于各种不同的应用场合，通常包括以下几类：

1）自整角机（力矩式、控制式、多极型、固态型、霍尔型等）。

2）旋转变压器（正余弦式、线性式、特殊函数式、多极型、磁阻型、固态型、霍尔型、感应移相器等）。

3）感应同步器（旋转式和直线式）。

4）轴角编码器（接触式、光电式及磁电式等）。

5）其他角位传感器（电阻型、电容型、电感型等）。

1.2　特点

角位传感电机常被用于自动控制系统和计算装置中，实现机电信号的检测、解算和转换等功能，其能量转换是次要的，要求其可靠性高、精度高。因此在设计、制造、试验等方面具有与常规电机不同的特点。

1.2.1　设计特点

1）设计角位传感电机时，要把保证产品的精度指标放在第一位，而把能量转换放在次要位置，设计的各个环节都要考虑影响产品精度的不利因素并加以预防。如主要尺寸的确定，冲片的结构尺寸和磁路尺寸的确定，定、转子冲片的齿槽选择等。

2）气隙磁场波形是保证角位传感电机高精度的基础。因此保证电机磁路的对称性以及绕组导体沿铁心周围的分布规律适应磁场波形的要求，是角位传感电机设计中的重要特点，设计时应从磁性材料的选择、绕组的设计、磁路参数的计算等方面确保电磁参数的对称性。

3）角位传感电机一般品种多、批量小，每个规格的产品用量都不是很大，因此关键零部件设计应考虑相同或相近尺寸不同性能参数要求产品的通用性。如做到一个机座号的同类产品冲片、铁心、机壳、端盖等统一设计。

4）考虑到角位传感电机的固有特性及对不同工作环境的适应性，设计时要采用有效的措施，保证电机的输出特性、接触电阻、精度等变化满足特殊使用场合所提出的要求。如零部件原材料的选择，设计时采取的绕组补偿措施等。

1.2.2　工艺特点

角位传感电机的高精度不仅需要从设计上来保证，更需要有特殊的工艺制造方法加以保证。其制造工艺特点是：要达到磁路的对称和电路的平衡，就要保证定、转子关键零部件的配合尺寸、形位公差精度等级高，加工制造中需要精密的加工设备及先进的工艺措施。零部件在热处理、绝缘处理过程和周转等过程中，处理不当，就会造成变形，影响电机磁路的对称性，因此角位传感电机的专业工艺较多，而且工艺规范要严格得多。生产特点是品种繁多，批量小、标准化、系列化和零部件的通用化程度高。

1.2.3　试验特点

角位传感电机测试专用设备多，而且精度要求高。函数误差、电气误差、零位电压、相位移等的测量，均要求配备精度比被测电机精度高一个数量级的专用测试设备和仪器。如光栅分度头、函数桥、相敏电压表、角位指示器、倍频器等的误差要控制在角秒级，感应分压箱的精度应达 10^{-5}。

角位传感电机试验项目多而复杂。按 GB/T 7345—1994《控制微电机基本技术要求》分为出厂检验和型式试验，按 GJB 361A—1997《控制电机通用规范》主要分为质量一致性检验和鉴定试验，军品角位传感电机还要求做验收试验。试验项目主要包括阻抗测试、电刷接触电阻变化检查、绝缘电阻、绝缘介电强度测试及高低温、冲击、振动等多项环境适应性试验。一些重要指标如零位电压、电气误差、接收误差、摩擦力矩、轴向间隙、电刷接触电阻变化等在各项环境适应性试验之后必须重复检测，有些试验还要求在环境试验箱内测试。

1.3　发展趋势

传统的自整角机、旋转变压器等角位传感电机作为最早发展起来的控制微电机，设计技术已趋成熟，我国的产品性能指标与国际水平相当，但制造工艺技术、测试技术与国际水平有较大差距，新原理、新应用的角位传感电机水平也落后于国际先进水平。

为了适应军事装备、工业自动化设备向高精度、高可靠性、小型化、集成化方向发展，并适应不同市场的需要，作为重要控制元件的角位传感电机今后的发展趋势是：

1）向高可靠性方向发展。无论军用产品还是民用产品，无刷化的角位传感电机正在占据越来越重要的位置。传统角位传感电机用以传输信号的电刷、集电环是电机可靠性最薄弱的环节，寿命不高，还会产生无线电干扰。利用电磁感应原理开发的无刷自整角机、旋转变压器、感应移相器，实现了信号的无接触传输。磁阻式旋转变压器是基于磁导变化原理的磁阻式角位传感电机，在小机座号上实现了多极设计，具有结构简单、可靠性高、体积小、精度高等一系列优点而适应于数字伺服系统。

2）向高精度方向发展。伴随着装备精度要求的提高和新型装备的开发，要求角位传感电机精度达数分至数十秒甚至几秒，而精度为分级的单对极自整角机、旋转变压器、感应移相器已不能满足要求，先后出现了电气变速的双通道系统以及精度达秒级的双通道自整角机、旋转变压器、感应移相器；采用补偿技术，补偿因外界环境变化引起的性能变坏和不稳定，可使磁阻式旋转变压器能在各种状态下工作，还可大大降低磁阻式旋转变压器的误差；余度技术的采用也越来越多，双余度双通道无接触角位传感电机作为高精度、高可靠性产品在武器装备系统应用日益增加。

3）向组合化、小型化、专用化、数字化和固态化方向

发展。在体积和重量有着严格限制的星、弹、箭、机等国防军事装备，以及工业自动化方面对配套产品的精度和可靠性要求越来越高，要求将角位传感电机、速度传感电机、伺服电机、减速器等根据不同用途组合成为组件，缩小体积，提高精度。开发三通道自整角机和旋转变压器组件，可提高电机的分辨率。为适应全数字控制要求，目前采用的方案有传统电机加 A/D 模数转换器或 D/A 数模转换器；利用电子技术，实现信号传输、解算、编码的固态自整角机和旋转变压器。

2 自整角机

在角位传感电机甚至是控制电机的发展史上，自整角机是应用最早的一种轴角测量元件。早在 19 世纪 80 年代，俄国及其他国家的学者先后创造出由自整角机构成的同步连接系统。自整角机是按照电磁感应原理而工作的机电元件，通常是两台或多台组合使用，使机械上互不相连的两根或多根机械转轴能够精确地保持相同的转角变化，或同步旋转，实现角位置的远距离传输、转换和指示。

2.1 分类

自整角机有多种分类方法，按在系统中的功用可分为力矩式和控制式两大类；按结构型式可分为接触式和无接触式；按供电电源可分为单相、三相和直流；按极对数可分为单对极和多极；按运动方式可分为旋转式和直线式。通常所说的自整角机就是单相、单对极、接触式、旋转式的力矩式或控制式自整角机。

2.1.1 力矩式自整角机

力矩式自整角机主要用于指示系统中，这类自整角机本身不能放大力矩，要带动接收机轴上的机械负载，必须由自整角发送机一方的驱动装置供给转矩。力矩式自整角机系统好像是通过一个弹性连接的、能在一定距离内扭转的轴来带动负载的。故只适用于负载较轻（如指针、刻度盘）、角度传输精度要求不高的开环控制系统中。按其用途可分为 4 种：

1）力矩式发送机（ZLF）。将转子转角的变化转变成电信号输出，输送至力矩式接收机。可带动 1 台或数台力矩式接收机一起工作。

2）力矩式接收机（ZLJ）。接收力矩式发送机的电信号，转变成转子的机械角输出。

3）力矩式差动发送机（ZCF）。串接于力矩式发送机与接收机之间，将力矩式发送机的转角及自身转角的和（或差）转变成电信号输出，输送至力矩式接收机。

4）力矩式差动接收机（ZCJ）。串接于两个力矩式发送机之间，接收其电信号，并使自身转角为两个力矩式发送机转角的和（或差）。

2.1.2 控制式自整角机

控制式自整角机主要用于自整角机和伺服电机组成的随动系统中，其驱动负载能力取决于系统中的伺服机容量，故能带动较大的负载。由控制式自整角机组成的闭环系统精度较高。按其用途可分为 3 种：

1）控制式发送机（ZKF）。将转子转角的变化转变成电信号输出。

2）控制式变压器（ZKB）。接收控制式发送机的电信号，转变成与失调角呈正弦关系的电信号。

3）控制式差动发送机（ZKC）。串接于发送机与变压器之间，将发送机的转角及自身转角的和（或差）转变成电信号输出，输送至控制式变压器。

2.2 结构

自整角机主要由定子和转子两大部分组成，定子和转子分别有自己的电磁部分和机械部分。图 5.15-1 是装有机械阻尼器的力矩式自整角机接收机的结构剖面图。

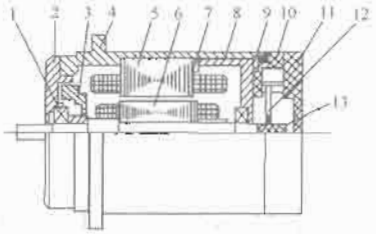


图 5.15-1 力矩式自整角机接收机结构剖面图
1—轴承；2、8—端盖；3—阻尼器；4—机壳；5—定子；6—转子；7—垫圈；9—接圈；10—接线板；11—端罩；12—电刷；13—集电环

2.2.1 发送机、接收机的结构

力矩式发送机和控制式发送机在结构上是一样的，力矩式接收机也基本相同，只是在阻尼时间不能满足的情况下，在机壳内或外增加一个机械阻尼器。就铁心结构而言，有三种结构型式：

1）隐极定子铁心，凸极转子铁心。铁心冲片结构如图 5.15-2（a）所示，定子铁心上布置三相整步绕组（星形联结的对称分布绕组），励磁绕组集中安放在凸极转子铁心极间区域内，通过两组电刷和集电环引出。

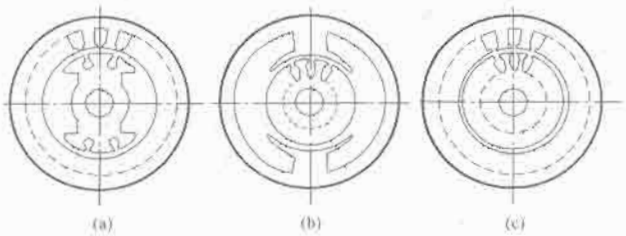


图 5.15-2 自整角机铁心冲片结构图

凸极转子极靴上的槽孔安放和励磁绕组正交的阻尼绕组，分单阻尼绕组和双阻尼绕组两种型式，如图 5.15-3 所示。阻尼绕组的作用有两个：改善和降低自整角机的交轴参数，以提高比整步力矩并产生阻尼效应，使自整角机不致产生不衰减振荡、失步或自转，能够很快停留在协调位置上；减少发送机的电气误差，提高精度。

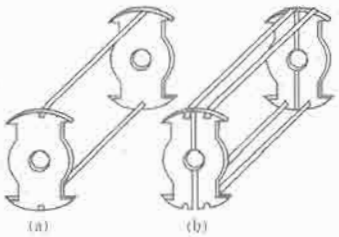


图 5.15-3 凸极阻尼绕组型式
(a) 单阻尼绕组；(b) 双阻尼绕组

当阻尼绕组的作用还不能完全消除振荡时，需要采用机械阻尼器。通常采用的是图 5.15-4 所示的两级惯性摩擦的机械阻尼器。机械阻尼器的基本元件是惯性轮和摩擦装置，适当选择惯性轮的惯量、惯性轮和轴套之间的公差配合和表面粗糙度、阻尼器的弹簧压力等，可以得到良好的阻尼效果。

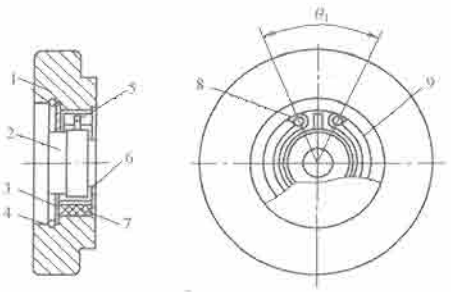


图 5.15-4　两级惯性摩擦机械阻尼器
1—飞轮；2—轴套；3—盖板；4—弹性卡圈；5—销钉；6—产生一级摩擦的表面；7—摩擦片；8—弹簧圈；9—产生二级摩擦的表面

这种铁心结构型式的优点是：转子重量轻，集电环数少，可靠性和精度较高。缺点是励磁电流长期流过电刷、集电环，尤其在随动系统中当发送机和接收机的转子处于协调位置而停转时易造成电刷和集电环的固定接触处长期发热而烧坏集电环。所以这种结构适用于容量较小的指示式远距离角度传输系统。我国国标、军标系列型谱中的产品基本上采用这种结构。

2）凸极定子铁心，隐极转子铁心。铁心冲片结构如图 5.15-2（b）所示，单相励磁绕组也可以放置在定子凸极铁心上，而在转子隐极铁心上布置三相整步绕组，并通过三组电刷和集电环引出。这种结构的优点是：当系统中有失调角时，即自整角机转子转动时，电刷和集电环上才有电流流过，集电环的工作条件好，而且转子铁心上布置三相对称绕组，平衡条件也好。缺点是转子重量大，集电环数目多，摩擦力矩较大，精度较低。所以这种结构主要用于容量较大的力矩式自整角机中。我国早期生产的 DI、SS 系列力矩式自整角发送机、接收机都采用这种结构。

3）隐极定子铁心，隐极转子铁心。铁心冲片结构如图 5.15-2（c）所示，这种结构定子绕组、转子绕组都可作为励磁方。当转子绕组作为励磁方时，定子铁心上布置三相整步绕组，转子铁心上布置励磁绕组和正交阻尼绕组，其绕组型式有两种：第一种是铁心内布置两相正交绕组，一相作为励磁绕组，一相短接作为阻尼绕组；第二种是铁心内布置三相对称绕组，其中两相并联作为励磁绕组，另一相短接作为阻尼绕组。为了调整适当的横轴参数，大机座号（70#）以上的中频力矩式自整角机采用第一种结构。

一般情况下，同机座号的力矩式自整角机和接收机的电气参数相同，因此无机械阻尼器的接收机可以直接作发送机用，而发送机作接收机使用时，需降低摩擦力矩，进行接收机静态误差和阻尼时间试验。

力矩式发送机和控制式发送机的结构一样，但是力矩式发送机要求比整步力矩大，开路输入阻抗低，零位电压要求不高。控制式发送机无比整步力矩要求，开路输入阻抗高，零位电压要低，因此在零位电压要求不高的系统，力矩式发送机可以替代控制式发送机。

2.2.2　自整角变压器、差动式自整角机的结构

自整角变压器和差动式自整角机的定、转子铁心均为隐极式结构，自整角变压器定子铁心上布置三相整步绕组，转子上布置单相高精度的正弦输出绕组。自整角变压器采用隐极式转子结构的优点是：可以降低从发送方得到的励磁电流，有利于自整角变压器与发送机并联工作；气隙均匀，在运行时，三相整步绕组的合成磁动势在空间任一位置的气隙磁导都相同，可以避免磁通波形畸变而影响输出电动势；气隙磁导相同，无反应力矩，可以提高自整角变压器的精度。

差动式自整角机定、转子铁心上均布置三相整步绕组，转子绕组通过三组电刷和集电环引出，定、转子绕组参数相近。同样在零位电压要求不高的系统，力矩式差动发送机可以替代控制式差动发送机，为了保证力矩式差动接收机能满足阻尼时间的要求，需要在其轴上装设机械阻尼器。

在具有力矩式自整角接收机和控制式自整角变压器的混合系统中，力矩式发送机的零位电压如能满足系统要求，可以作为系统的发送机，但不宜选用控制式发送机。

2.2.3　无接触自整角机的结构

1）复合磁路的无接触式自整角机。它的结构如图 5.15-5 所示。定子和一般自整角机一样，也是铁心上布置三相星形对称绕组；转子由两个互无磁性联系的 Γ 形导磁体组成，两者之间由非导磁体隔开；外导磁体由两个导磁环和四组轴向旋置的导磁片连接而成，励磁绕组由两个环形线圈组成，线圈放置在定子绕组端部和导磁环之间；转子上没有绕组。

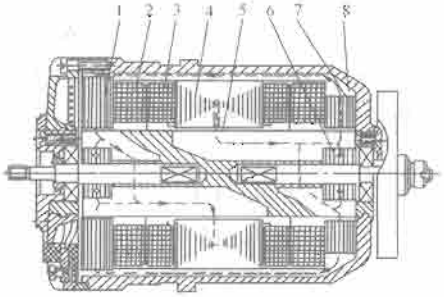


图 5.15-5　复合磁路的无接触式自整角机
1、7—导磁环；2—励磁绕组；3—定子绕组；4—定子铁心；5—转子铁心；6—端部导磁环；8—外导磁体

和接触式自整角机相比，这种结构的无接触式自整角机磁路比较复杂。在其他条件相同的情况下，其励磁电流及损耗较大，相位移也大，精度相对较差。这种结构的无接触式自整角机的转子上没有阻尼绕组，为了消除接收机转子在运行中的振荡现象，通常在它的转子上装机械阻尼器。

2）变压器耦合的无接触自整角机。这是目前广泛应用的一种结构，是用环形变压器代替接触式自整角机中的电刷和集电环，通过变压器原理，将电气信号引入或引出转子的无刷自整角机。环形变压器一般都做成单相输出或输入，即一般只有发送机、接收机和控制式自整角变压器，无接触式差动自整角机因需要三个环形变压器，设计及结构较为复杂而很少使用。目前国内外普遍采用整块导磁材料做环形变压器的铁心，如图 5.15-6 所示。

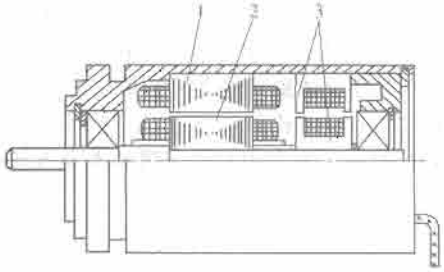


图 5.15-6　带环形变压器的无接触式自整角机
1—定子；2—转子；3—环形变压器

2.3　工作原理

在系统中自整角机通常是两个或两个以上组合使用，故

各类自整角机的工作原理一般以成对运行状态来叙述。

2.3.1 力矩式自整角机的工作原理

力矩式自整角机的工作原理图如图 5.15-7 所示。图中发送机和接收机的励磁绕组以同一单相交流电励磁，三相整步绕组彼此对应相接，在各自的三相绕组中产生的感应电动势是由同一个脉振磁场所感应的时间相位相同的变压器电动势，其大小取决于各相整步绕组和励磁绕组之间的相对位置。

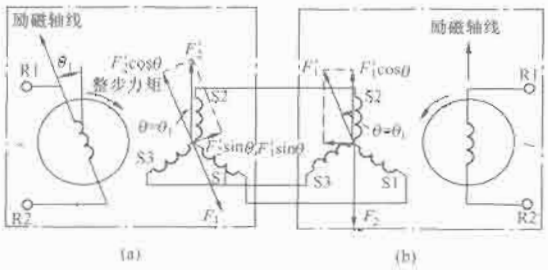


图 5.15-7 ZLF-ZLJ 的工作原理

(a) 力矩式发送机（ZLF）；(b) 力矩式接收机（ZLJ）

当两者的转子从基准电气零位逆时针转过 θ 角度后，在各自的三个定子绕组中所感应的线电压为

$$\left.\begin{aligned} U_{S1S3} &= U_m\sin\theta \\ U_{S3S2} &= U_m\sin(\theta+120^\circ) \\ U_{S2S1} &= U_m\sin(\theta-120^\circ) \end{aligned}\right\} \qquad (5.15\text{-}1)$$

式中，U_m 为定、转子绕组轴线重合时，在定子绕组中感生的最大输出电压，V；$U_m=KU_f$，这里 U_f 为励磁电压，V；K 为电压比。

当发送机和接收机处于相同的角度位置时，即无失调角时，两者所感应的电压完全相同，各相整步绕组回路中无电动势存在，绕组中不产生电流，两者处于协调位置。当发送机和接收机处于不同的角度位置时，各相整步绕组回路中有电动势存在，就会产生时间相位相同、大小不同的各相电流。此电流和励磁绕组产生的主磁通相互作用并产生整步转矩，它力图使接收机转子转到与发送机相同的角度位置，即力图使失调角为零，使系统进入新的协调位置。这样通过力矩式发送机与接收机的非机械的软连接，把发送机主动轴上的机械角同步地传送至负载轴，实现了远距离同步传输的目的。

如果要求力矩式接收机所指示的角度为两个已知转角的和或差时，则可在发送机和接收机之间接上一台力矩式差动发送机。

如图 5.15-8 所示，当力矩式发送机从基准电气零位逆时针转过 θ_1 时，差动式发送机定子绕组产生的磁动势亦逆时针偏转 θ_1。当差动式发送机逆时针转过 θ_2 时，则差动式发送机转子与定子合成磁动势之间的角度 $\theta=\theta_1-\theta_2$，在整步转矩的作用下，接收机转子将过 θ，达到新的协调位置，即接收机转过的角度为力矩式发送机和差动发送机两转子转角的差。若力矩式发送机逆时针转过 θ_1，差动发送机顺时针转过 θ_2，则接收机转过的角度为 $\theta=\theta_1+\theta_2$。

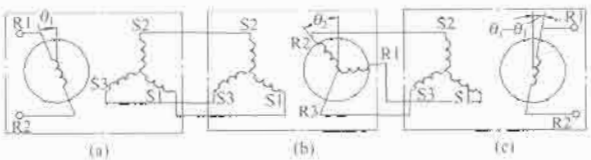


图 5.15-8 ZLF-ZCF-ZLJ 的工作原理图

(a) 力矩式发送机（ZLF）；(b) 力矩式差动发送机（ZCF）；(c) 力矩式接收机（ZLJ）

也可在两台力矩式发送机之间接入一台力矩式差动接收机，该接收机所指示的角度为两台力矩式发送机的和或差。

如图 5.15-9 所示，当两台力矩式发送机分别从基准电气零位逆时针旋转 θ_1 和 θ_2 时，差动接收机定子的合成磁动势和转子的合成磁动势之间空间位置的角差为 $\theta=\theta_1-\theta_2$，在电磁转矩的作用下，差动接收机转子将转过 θ，使定、转子的合成磁动势在空间趋于一致。所以差动接收机转过的角度也就是两台发送机转子转角的差。若一台力矩式发送机逆时针转过 θ_1，另一台力矩式发送机顺时针转过 θ_2，则差动接收机转过的角度为 $\theta=\theta_1+\theta_2$。

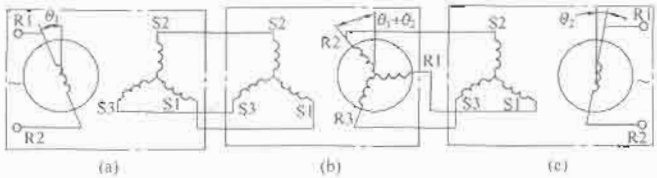


图 5.15-9 ZLF-ZCJ-ZLJ 的工作原理图

(a) 力矩式发送机（ZLF）；(b) 力矩式差动接收机（ZCJ）；(c) 力矩式发送机（ZLF）

2.3.2 控制式自整角机的工作原理

力矩式自整角机用于角度的直接传输存在着许多缺点：整步转矩较小，只能带动轻负载；角度传递误差高达 1°～2°，且误差随负载及转速的增大而增大；当带动多台接收机工作时，接收机的整步力矩随之降低而引起传递误差进一步增大；属于低阻抗元件，温升较高。

为了提高自整角机系统的精度和负载能力，在随动系统中广泛采用了由控制式自整角机和伺服电机组合的系统，其工作原理如图 5.15-10 所示。图中控制式发送机和变压器的三相绕组对应联结，发送机的转子接单相交流电源，控制式变压器的单相绕组作为输出绕组。这样控制式发送机的定子绕组中感应出转子角位置相应的三组电压，此电压在发送机及变压器组成的绕组回路中产生电流，这个电流在各自的绕组中建立磁动势产生磁通，在变压器的输出绕组中产生的电压为

$$U_2 = U_{2m}\sin\theta \qquad (5.15\text{-}2)$$

式中，U_{2m} 为变压器绕组的最大输出电压，V；θ 为发送机和变压器之间的失调角，$\theta=\theta_1-\theta_2$。

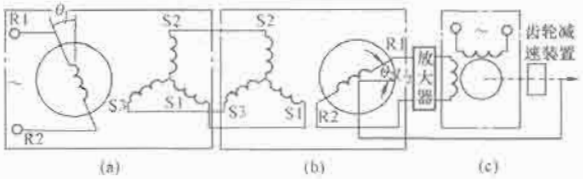


图 5.15-10 ZKF-ZKB 的工作原理图

(a) 控制式发送机（ZKF）；(b) 控制式变压器（ZKB）；(c) 伺服电动机

控制式变压器的输出电压接至放大器，放大器的输出接至伺服电动机的控制绕组。由伺服电动机驱动负载，并同时通过减速装置带动控制式变压器的转子构成机械反馈，当控制式变压器的转子偏转后，失调角减小，并使其输出绕组的电压信号减小，直至失调角为零。此时 $U_2=0$，放大器无电压输出，伺服电动机停止旋转，系统进入协调位置。

差动式自整角机也可以用于控制式自整角发送机和自整角变压器系统中，当控制式发送机和自整角变压器中间再接入一台控制式差动发送机后，则自整角变压器的输出电压为发送机转子和差动发送机转子转角的和或差的正弦函数。

如图 5.15-11 所示，当控制式发送机从基准电气零位逆时针转过 θ_1 后，差动式发送机定子绕组产生的磁动势亦逆时针偏转 θ_1。当差动式发送机逆时针转过 θ_2 时，则差动式发送机中转子与定子合成磁动势之间的角度 $\theta=\theta_1-\theta_2$，则自整角变压器的输出电压为 $U_2=U_{2m}\sin(\theta_1-\theta_2)$。若控制式发送机逆时针转过 θ_1，差动式发送机顺时针转过 θ_2，则自整角变压器的输出电压为 $U_2=U_{2m}\times\sin(\theta_1+\theta_2)$。

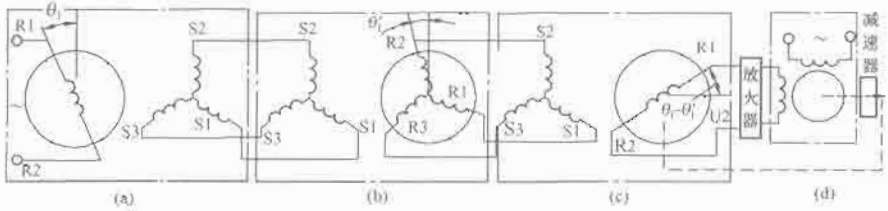


图 5.15-11　ZKF-ZKC-ZKB 的工作原理图

(a) 控制式发送机 (ZKF)；(b) 控制式差动发送机 (ZKC)；(c) 控制式变压器 (ZKB)；(d) 伺服电动机

2.4　主要技术指标和参数

2.4.1　电气参数

1) 额定励磁电压 U_f 和频率 f。常用频率 f 为 50Hz、400Hz，国外常用频率为 60Hz、400Hz。

2) 励磁电流 I_0 和励磁功率 P_0。指初级绕组两端施加额定励磁电压和频率，次级绕组开路时，自整角机的励磁电流和所消耗的功率。对差动式自整角机和控制式自整角变压器来说，初级绕组为三相，则为将其中两相短接、施加电压值为 0.866 倍的额定线电压，次级绕组开路时，自整角机的励磁电流和所消耗的功率。差动式自整角机一般将定子三相绕组定为初级。

3) 最大输出电压 U_2。指次级绕组感应的最大电压，若次级绕组为三相，则是线电压的最大值。KL 系列常用额定励磁电压/开路最大输出电压的组合有：115V/90V、110V/90V、90V/58V、36V/16V、16V/32V、16V/16V。

2.4.2　阻抗参数

一般而言，自整角机的阻抗和交直轴、一、二次之间的相互位置有关，即随转子转角而变化。因此通常所说的阻抗为特定位置时所测取的阻抗值。自整角机的初级、次级是典型的变压器关系，所有的阻抗计算都是将自整角机看成四端变压器形式的电磁元件。常用阻抗参数有以下四种：

1) 开路输入阻抗。初级绕组两端励磁，次级绕组两端开路时的阻抗，取直轴位置。

2) 开路输出阻抗。次级绕组两端励磁，初级绕组两端开路时的阻抗，取直轴位置。

3) 短路输入阻抗。初级绕组两端励磁，次级绕组两端短路时的阻抗，取初级绕组、次级绕组轴线一致的位置。

4) 短路输出阻抗。次级绕组两端励磁，初级绕组两端短路时的阻抗，取初级绕组、次级绕组轴线一致的位置。

2.4.3　最大整步转矩

整步转矩的产生是由直轴的磁通和交轴的磁动势以及交轴的磁通和直轴的磁动势相互作用引起的。由于直轴磁动势分量很小，可以忽略不计，则整步转矩仅为直轴的磁通和交轴的磁动势的函数。整步转矩 T 的常用公式为

$$T=\frac{0.1194}{f}U_m^2\frac{x_q}{x_q^2+r_q^2}\sin\theta \qquad (5.15\text{-}3)$$

式中，T 为整步转矩，N·m；x_q 为整步交轴电抗，Ω；r_q 为整步交轴电阻，Ω；整步转矩 T 的大小与失调角呈正弦函数关系，当失调角为 90°时，整步转矩达最大值，即最大整步转矩 T_{max}。

2.4.4　比整步转矩

力矩式自整角机系统中，发送机和接收机在协调位置附近失调角为 1°时所产生的整步转矩，称之为比整步转矩，见式 (5.15-4)。它的大小表征了自整角机克服摩擦转矩及反应转矩的能力，是影响接收机接收误差的重要因素。比整步转矩越大，指示系统的指示精度越高。在同样的摩擦转矩条件下，比整步转矩越大，接收机的接收误差越小。

$$T_0=\frac{0.1194}{f}E_m^2\frac{x_q}{x_q^2+r_q^2} \qquad (5.15\text{-}4)$$

由式 (5.15-4) 可以得出以下结论：

1) 在频率 f 一定的情况下，若阻抗参数不变，比整步转矩 T_0 正比于相电动势 E_m 的二次方，而相电动势 E_m 大小取决于励磁电压 U_f，所以比整步转矩 T_0 就与励磁电压 U_f 的平方成正比。因此，力矩式自整角运行时，必须保证励磁电压稳定，通常电压的波动不允许超过±10%。若电压过低，比整步转矩将大幅度减小，致使角度传输的指示误差增大，精度也随之下降。反之，电压过高，又会使电机磁路饱和，励磁电流急增而使励磁绕组过热。

2) 在频率 f 和相电动势 E_m 一定的情况下，若交轴电阻 r_q 保持不变，则在 $x_q/r_q=1$ 时，比整步转矩 T 达到最大值。$x_q/r_q<1$ 时减小快，$x_q/r_q>1$ 时减小较慢 (见图 5.15-12)。

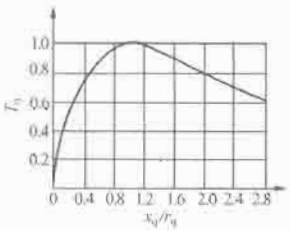


图 5.15-12　r_q 为常值时，T_0 与 x_q/r_q 的关系曲线

3) 在频率 f 和相电动势 E_m 一定的情况下，若交轴电抗 x'_q 保持不变，则随着交轴电阻 r_q 的增加，比整步转矩 T_0 减小，在 $r_q=0$ 时比整步转矩 T_0 最大 (见图 5.15-13)。因此，为得到尽可能大的比整步转矩，在设计时应利用交轴阻尼绕组，有效地调整交轴短路参数的大小，尽可能减小交轴电阻 r_q，使 $x_q=r_q$。

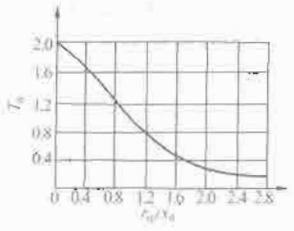


图 5.15-13 r_q 为常值时，T_0 与 r_q/x_q 的关系曲线

2.4.5 阻尼时间

阻尼时间指接收机与相同电磁性能的标准发送机同步连接后，失调角在177°±2°时，接收机从失调位置稳定到协调位置所需的时间。阻尼时间是考核接收机能否正常工作的重要指标。阻尼时间越小，接收机的跟踪性能越好。一般阻尼时间不超过3s。要减小阻尼时间，避免不衰减的振荡发生，往往要使交轴电阻 r_q 大于交轴电抗 x_q，这和比整步转矩参数的调整矛盾，设计时应权衡利弊，综合考虑。

2.4.6 接收误差

力矩式自整角系统中，在协调位置时，接收机与发送机转子转角之差，称为接收误差。接收误差是考核接收机的主要精度指标，包括静态误差（发送机缓慢转动到某一位置并固定时，接收机跟随发送机的误差）和动态误差（发送机以某一速度旋转，接收机跟随发送机旋转，两者的角位置差）。

自整角机在较低转速（500r/min以下）时的动态误差与静态误差基本一致，高速旋转时会使误差增大，但对于力矩式系统，动态运动场合很少，因此国标及军标考核的均为静态误差。

产生静态误差的原因，是由于阻力矩的存在。阻力矩阻止接收机向协调位置移动，使得接收机与发送机之间存在失调角，产生整步转矩，当整步转矩大于阻力矩时，接收机向协调位置移动。

阻力矩包括轴承、电刷和集电环产生的摩擦转矩；转子重心不在旋转中心上引起的重力转矩；定子磁导各向不均匀引起的二次周期反应转矩；三相绕组和定子铁心中短路引起的二次周期反应转矩；工艺欠缺引起的反应转矩；定、转子齿槽效应引起的反应转矩等，设计、加工过程中要采取措施消除。

国家标准及国家军用标准将接收机的接收误差（静态）规定为三个等级：零级品（≤0.5°）、Ⅰ级品（≤1.0°）、Ⅱ级品（≤2°）。

2.4.7 电气误差

自整角机的输出电动势和转子转角之间理论上应符合一定的函数关系，但由于设计、工艺等因素的影响，实际转角与理论值有差异，此差值即为电气误差（单峰值、平均值、方均根值等），控制式系统的精度主要取决于它。电气误差的存在，使得发送机和接收机（变压器）的定子磁场轴线不一致，使气隙磁场畸变，造成系统的指示误差（伺服系统的误差）增大。

自整角机的电气误差可分成两大类：

1）设计局限性产生的固有误差。①由于绕组非正弦分布，励磁磁场里产生（$6k\pm1$）次的高次谐波，在输出绕组感应出（$6k\pm1$）次的高次谐波电动势，使误差作 $6k$ 周期的变化。②定、转子开槽产生的齿谐波磁导，也会使励磁磁场里产生（$6k\pm1$）次的高次谐波。

2）工艺局限性产生的工艺误差。工艺局限性、几何尺寸不准确，会使自整角机气隙磁场发生畸变。定子椭圆、铁心冲片材料磁导率的各向异性、铁心或绕组中存在短路现象等工艺局限性是影响电气误差的最大因素，在电气误差曲线中一般表现为二次周期的低次误差。

为提高自整角机精度，减小电气误差，应在设计上采取有效措施，如选用对高次谐波不敏感的绕组型式；选择适当的极弧系数和极弧型式，有目的地削弱高次谐波；合理地设计正交阻尼绕组；正确的齿槽配合；合理的磁路尺寸、磁负荷、气隙等。

国家标准及国家军用标准将自整角机的电气误差也规定为三个等级：零级品（≤5′）、Ⅰ级品（≤10′）、Ⅱ级品（≤20′）。

2.4.8 零位电压

自整角机处于电气零位时的输出电压称为零位电压。它由两部分组成：一部分是与励磁电压同频、相位相差90°电角度的基波正交分量，另一部分是频率为励磁电压频率奇数倍的各次谐波分量，这两部分合成为零位电压总值。

应用于模拟解算系统和小功率随动系统的自整角机，最后的输出电压都要经过放大器输入到伺服电动机使之转动，所以零位电压过大，会使放大器饱和影响有用信号的输出，降低系统的灵敏度。因此不同的系统对零位电压的大小有不同的要求，航空系统比海陆系统要求严，解算系统比小功率随动系统要求严。零位电压的总值一般为最大输出电压的0.1%左右。

零位电压的基波分量是由于电磁不对称，铁心冲片材料的不均匀性及铁心中的铁损耗所引起的。如定子内圆和转子外圆椭圆是影响零位电压基波分量的主要原因。

零位电压的谐波分量主要是由于导磁材料的磁化曲线非线性、铁心局部饱和和电源波形畸变引起的。如磁路饱和，定、转子铁心的轴向锥度，铁心中的毛刺等。

2.4.9 比电压

比电压指自整角变压器与发送机处于协调位置附近，失调角为1°时的输出电压值。比电压较大，可以提高系统的灵敏度，直接影响对伺服放大器的要求。

2.4.10 输出相位移

输出相位移是指自整角机输出电压的基波分量与励磁电压的基波分量之间的时间相位差。这个指标是针对发送机和控制式自整角机的，其大小主要和阻抗参数有关，电阻大、漏抗大，铁心中损耗大，输出相位移则较大。因此，一般频率高、几何尺寸大的自整角机输出相位移较小。在控制式自整角机和伺服机构所组成的随动系统中，希望交流伺服电动机控制电压和励磁电压相位差相差90°电角度。而其励磁绕组串联电容后和自整角发送机接同一电源，控制电压由自整角变压器的输出电压经放大器放大后供给。因此自整角变压器输出电压的相位移，直接影响到系统的移相要求。

2.5 设计要点

2.5.1 结构设计

自整角机的结构设计以提高可靠性与延长工作寿命为主要目标，并采取以下措施：

1）电刷及集电环采用导电性能优良、耐磨性能好的金基合金材料，经热处理可增加硬度，提高耐磨性能，还应按

工艺要求细心抛光，以提高可靠性和寿命。

2）重要用途的自整角机的机壳、端盖、转轴、轴承、螺钉、螺母等零件，应采用具有防潮湿、防盐雾及耐腐蚀性能的不锈钢，以满足使用可靠性要求。一般用途的自整角机的机壳、端盖等结构件可采用铝合金，但其表面应经阳极氧化处理。其轴承则采用由轴承钢制成的高精度的双面或单面防尘盖轴承。

3）自整角机的结构应坚固、耐用，能经受严酷的环境条件，并尽量避免使用螺钉、螺母作零部件的连接件。

4）为了提高精度，小机座号自整角机常采用“一刀通”的结构型式，即定子铁心内径与轴承室内径的尺寸完全相同，并一次加工完成。

2.5.2　电磁设计

自整角机品种很多，实际应用中均是数个自整角机连成系统使用，因此设计时不仅仅是进行单个产品设计，还应考虑通用性、系列性和派生性，遵守下列设计原则：

1）设计凸极自整角机定子冲片时，应考虑用于其他品种时的通用性。力矩式发送机和控制式发送机的凸极转子冲片通用，控制式变压器和差动式自整角机的隐极转子冲片通用（槽数应既是 3 又是 2 的倍数，一般为 12），同一机座号的各类定子冲片通用（槽数一般为 15 或 21）。定子冲片设计时应综合考虑凸极和隐极自整角机的特点，进行合理的设计：

① 定子内径不宜过小。凸极自整角机接收机希望定子内径小，增加定子槽面积，降低整步绕组电阻，提高比力矩，同时可使阻尼性能好，动态品质好；但对隐极自整角机来说，定子内径过小，会使转子槽面积太小，致使转子绕组设计不合理，线径太细，尤其在小机座号、低频率时更为明显。通常定子槽面积与转子槽面积之比在 1.2～1.7 之间。同时还应对 50Hz 与 400Hz 两种频率情况进行权衡，统筹兼顾，对每一机座号选择较恰当的定子内径值。一般定子内径取定子外径的 0.5～0.6 倍。

② 合理设计轭高。凸极自整角机的极弧系数一般在 0.6 以内，而隐极自整角机的极弧系数 $2/\pi \approx 0.637$，因此设计凸极自整角机定子冲片时，轭高应适当加大，这种冲片用于隐极自整角机时，会使定子轭部磁通密度不会高于齿部磁通密度太多，以保持合理的磁通密度分布。

2）各种自整角机中，力矩式发送机和接收机的最优方案最难选择，计算最为复杂，比力矩、阻尼时间、励磁电流、励磁功率等主要指标相互矛盾，错综复杂。而控制式自整角机可变因素少，指标较易实现。因此系列设计中，应把力矩式发送机和接收机的设计计算放在首位，力矩式自整角机以最大限度提高比整步转矩为宗旨，也就是尽可能地减小交轴阻抗中的电阻分量，使交轴电抗接近以至等于交轴电阻，比整步转矩达到最大。但是，小机座号的高阻抗的自整角变压器，由于匝数多、线径细，因此槽面积不能过小，设计中也要考虑到。

3）同机座、同指标的力矩式发送机和接收机技术指标大致一样，仅是接收机要求阻尼时间小，因此两者电磁方案应一致。

4）控制式发送机和控制式差动发送机的设计，可考虑与力矩式发送机和力矩式差动发送机一样。但是为使输出电动势的波形好，以降低零位电压，提高精度，控制式自整角机的电磁负荷应取得偏低。对于硅钢片的铁心，控制式发送机的铁心磁通密度一般取在 1T（10000Gs）左右，控制式差动发送机及控制式变压器还要相应降低，力矩式的铁心磁通密度可取在 1.2～1.5T（12000～15000Gs）之间。输入阻抗较低或一台带多台自整角变压器的控制式发送机，可按力矩式发送机设计或替代。

5）绕组型式。自整角机的绕组分为集中绕组和分布绕组两种，凸极自整角机无疑采用单相集中绕组作为励磁绕组。分布绕组有双层短距绕组、不等匝绕组和正弦绕组，采取哪种绕组型式，应从提高精度出发，结合性能要求和工艺性来考虑，一般控制式自整角机的定子、控制式差动发送机的转子采用不等匝绕组，自整角机变压器的单相输出绕组采用不等匝绕组或正弦绕组，力矩式自整角机的定子、力矩式差动发送机的转子三相绕组采用双层短距绕组或不等匝绕组。

2.5.3　设计与工艺对自整角机性能的影响（见表 5.15-1）

表 5.15-1　　设计与工艺对自整角机性能的影响

影响因素	影响指标						
	电气误差（增大）	接收误差（增大）	零位电压（增大）		阻尼时间	寿命（降低）	接触可靠性（降低）
			基　波	谐　波			
绕组设计不当，磁动势谐波大	✓	✓	✓				
磁路饱和			✓	✓			
定、转子齿槽配合不当	✓	✓					
凸极转子的极弧选择不当	✓	✓					
斜槽不当	✓	✓					
定、转子椭圆	✓	✓	✓				
定、转子不同轴	✓	✓	✓				
三相绕组不对称	✓	✓	✓				
绕组匝间短路	✓	✓	✓				
铁心局部受损			✓				
定子内圆、转子外圆有锥度				✓			
冲片槽分度差	✓	✓	✓				
导磁材料磁化曲线非线性				✓			
摩擦力矩大		✓					
铁心槽口毛刺				✓			
阻尼条虚焊或开路					✓		
电刷接触不良					✓	✓	✓
电刷压力不当					✓	✓	✓

注　✓表示对该项指标有影响。

2.6 试验、选用、故障及维护

2.6.1 试验

(1) 相关技术标准

现行技术标准有：

GJB 788A—1999《自整角机通用规范》（替代 GJB 788—1989）

GJB 1939—1994《无刷自整角机通用规范》

GJB/Z 46.1—1993《军用自整角机系列型谱》

GJB 1642—1993《自整角伺服力矩机通用规范》

GB/T 13138—1991《自整角机通用技术条件》（替代 GBn61—1979）

JB/T 56020—1992《自整角机产品质量分等》

JB/T 2657.1—1999《DI-150、153、SS-150、153 型接触式自整角机》（替代 JB 2657—1980）

JB/T 2657.2—1999《BD、BS 系列无接触式接触式自整角机》（替代 JB 2658—1980）

JB/T 2657.3—1999《ND、NS、NED、DN、DI、SS、TS 型接触式自整角机》（替代 JB 2658—1980）

我国自整角机早期产品型号由各个厂所自行制定，很不统一。JB/T 2657 标准所列为我国的早期产品，外形结构复杂，在逐步被淘汰，我国现在生产的 KL 系列产品，外形结构简单，标准化、通用化、系列化程度高，符合 GB/T 13138—1991、GJB 788A—1999，和 MIL-S-20708E—1987 标准相一致。表 5.15-2 给出国内外型号及出线标记对比。

(2) 电气误差试验

自整角机电气误差可采用比例电压指零法、比例电压梯度法或自动测试法进行测试。亦可用其他能保证精度的方法测试。

1) 比例电压指零法。此方法使用比较普遍，基本试验线路如图 5.15-14 所示，图中三角电桥由两个 10000Ω 的无感固定电阻器和一个 10000Ω 的无感电阻分压器组成。受试自整角机转子每转动 60°，三角电桥与输出端换接一次，电阻分压器接于自整角机最大输出电压端，固定电阻器接于自整角机较小输出电压端，相敏指零仪一端接于固定电阻器的公共端，另一端接于电阻分压器的可变端。试验时从基准电气零位开始，根据一定的电气角，将分压器按规定调节在相应的比值下，正方向转动转子，至相敏指零仪指示基波同相分量为零的位置，读取转过的角度，与电气角相比，超前为正误差，滞后为负误差，取绝对值最大的误差作为电气误差。

2) 比例电压梯度法。试验线路如图 5.15-15 所示，除用一台带补偿网络经校准的相敏放大器，一台指示器和记录仪代替相敏指零仪外，线路和操作均同比例电压指零法。校验放大器，使其给出的电气输出信号与电气误差成线性关

表 5.15-2 国内外型号及出线标记对照表

类型 \ 对比	国内 GBn 标准		国内 GB、GJB 标准		国际 MIL 标准	
	型号	出线标记	型号	出线标记	型号	出线标记
力矩式自整角发送机	LF	转子：Z+角码 定子：D+角码	ZLF	转子：R+角码 定子：S+角码	TX	转子：R+角码 定子：S+角码
力矩式自整角接收机	LJ		ZLJ		TR	
力矩式差动自整角发送机	LCF		ZCF		TDX	
力矩式差动自整角接收机	LCJ		ZCJ		TDR	
控制式自整角发送机	KF		ZKF		CX	
控制式自整角变压器	KB		ZKB		CT	
控制式差动自整角发送机	KCF		ZKC		CDX	

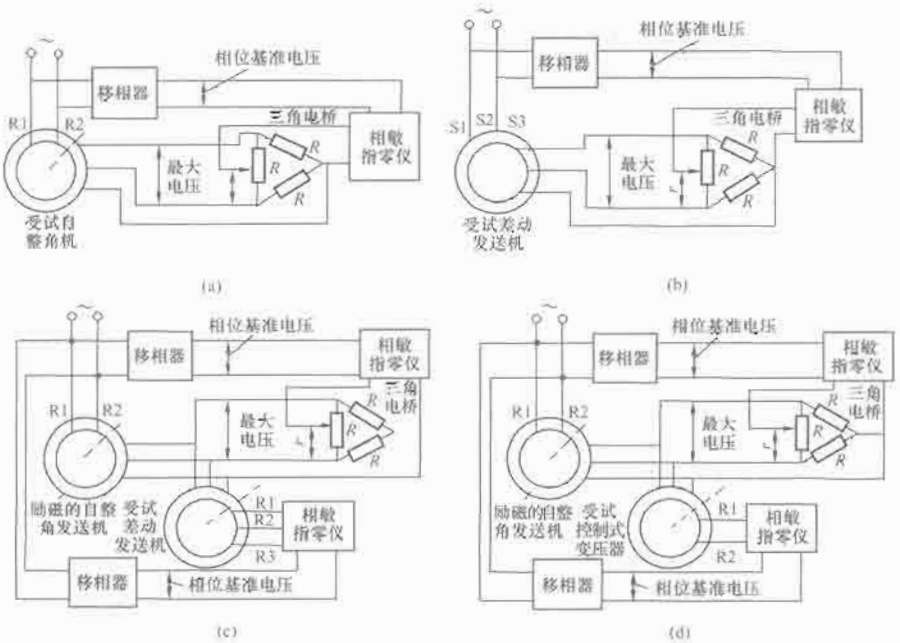


图 5.15-14 比例电压指零法测试线路

(a) ZKF、ZLF、ZLJ 型；(b) ZKC、ZCF、ZCJ 转子；

(c) ZKC、ZCF 和 ZCJ 定子；(d) ZKB 型

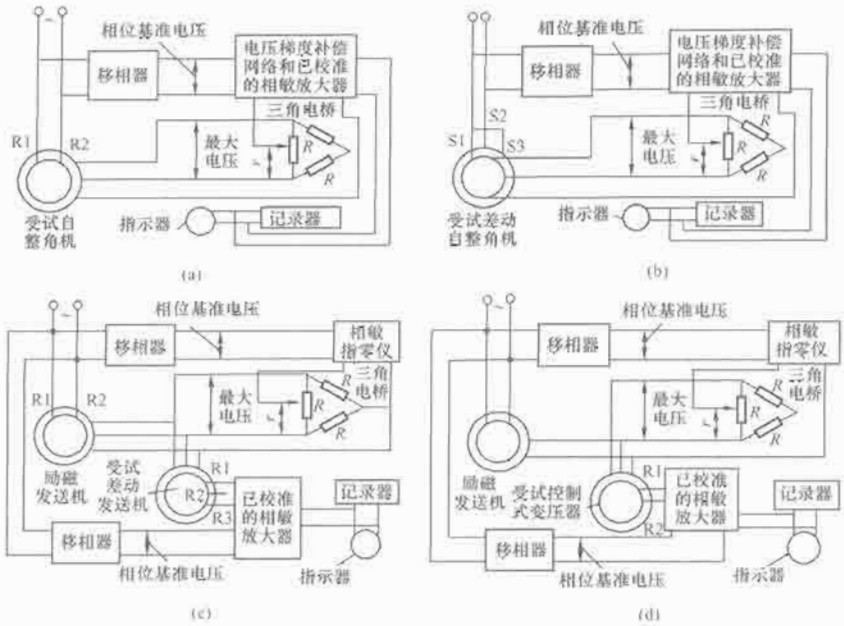


图 5.15-15　比例电压梯度法测试线路

(a) ZKF、ZLF、ZLJ 型；(b) ZKC、ZLF 和 ZCJ 转子；

(c) ZKC、ZCF 和 ZCJ 定子；(d) ZKB 型

系，电气误差将在指示器或记录仪上直接给出。该指示或记录装置，在不附加其他装置的情况下，至少应能分辨测出角度为 30″的电气误差。桥式电路的电压梯度补偿网络输出应在三角电桥的所有位置上具有相等的电压梯度。电压梯度是补偿网络输出电压 (U) 与转子偏离等效电桥位置的位移角 (θ) 之比。

3) 自动测试法。按 GJB 788A－1999 规定，一台自整角机要测试 72 点的电气误差，工作量大，用计算机进行控制的自动测试快捷而准确，其原理框图如图 5.15-16 所示。分度头由驱动电动机带动，光栅分度头数显表显示出机械角。受试自整角机的输出接至角位指示器并使其数字化。电气角度每变化 5°，信号发生器就输出一个信号，由计算机根据此信号采集受试自整角机的机械角。机械角与标准电气角之差即为电气误差，由打印机自动打印出。

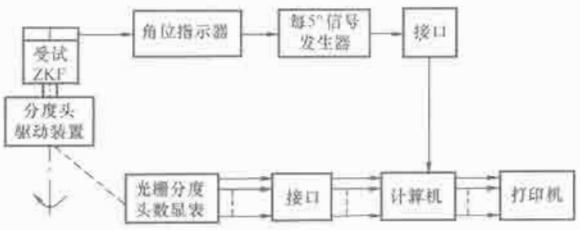


图 5.15-16　电气误差自动测试框图

(3) 接收误差

受试接收机与经校准的同机座号相同参数的标准发送机相连，力矩发送机转轴与控制变压器转轴机械连接。机组按规定励磁，并调至控制变压器零位，如果在试验设备中接入低通滤波器，该滤波器应能通过 10Hz 及以下的信号。将校准过的相敏指零仪接入控制变压器输出端，校准过的发送机和受试接收机应参照相同的基准，调至自整角机零位。试验时以不大于 1r/min 的转速转动力矩发送机转轴，相敏指零仪指示的最大绝对值即为接收误差。测出并连续记录两台自整角机同时以顺时针方向和逆时针方向的接收误差。

(4) 零位电压

按表 5.15-3 接线。施加规定的试验电压，转动转子在 0°、60°、120°、180°、240°、300°等位置，转动自整角机的转子使得相敏指零仪所指示的基波同相分量为零，读取零位电压。

表 5.15-3　　零位电压试验接线

自整角机类型	励磁接线端	指零仪接线	所在角度 (°)
ZLF、ZLJ、ZJF、ZKF	R2—R1	S1—S3	0，180
		S3—S2	60，240
		S2—S1	120，300
ZCF、ZCJ、ZKC	S1S3—S2	R3—R1	0，180
		R1—R2	60，240
		R2—R3	120，300
	S3S2—S1	R2—R3	0，180
		R3—R1	60，240
		R1—R2	120，300
	S2S1—S3	R1—R2	0，180
		R2—R3	60，240
		R3—R1	120，300
ZKB	S1S3—S2	R2—R1	0，180
	S3S2—S1		60，240
	S2S1—S3		120，300

2.6.2　选用

在选择自整角机时，首先应确定准备构成哪种系统。当精度要求不高、负载不重以及速度不快时，应该选用力矩式系统，否则应选用控制式系统。接着应综合考虑自整角机的电压、频率和尺寸的选择。自整角机应该运行在额定电压、频率下。一般应该选用电压低的，特别是对于小尺寸，低电压比较可靠。而且阻抗低，易于匹配。对于长线传输，应选

择电压高的，这样可降低长线上阻抗的影响。当空间尺寸受到限制时，应选用频率高的，小尺寸下，工频自整角机难于制造。一般情况下，数种不同尺寸的自整角机均能满足所要求的电气性能，在尺寸和重量要求不严时，应该主要考虑可靠性、工艺加工和成本问题。最后根据力矩式自整角机和控制自整角机的不同工作特点来选用。

(1) 力矩式自整角机的选用

1) 品质系数 S 和比整步转矩 T_0 的选择。因为阻力矩的存在，力矩式自整角接收机存在一个不灵敏区，不灵敏区的倒数就是品质系数 S($S = T_0/M_f$)，一台力矩式自整角机的比整步转矩与摩擦力矩 M_f 之比越大越好。品质系数大，则不灵敏区小，静态误差也小，选择力矩式自整角机不仅要看比整步转矩是否大，还要看它的品质系数是否也大。

2) 最大连续工作转矩的选择。成对运行的力矩式自整角机，当接收机轴上的负载力矩增大时，失调角增大，励磁电流和定子相电流也相应增大，绕组温度随之升高。当温度升高至绝缘温度等级时，会损坏绝缘使自整角机不能工作。因此最大连续工作转矩应不超过额定温升时所允许的转矩。

3) 最高连续工作转速的选择。自整角机的最高连续工作转速取决于在最高连续工作转速下接收机能否牵入同步。若速度太快，接收机不能牵入同步，以较低的速度旋转或不转，引起自整角机严重发热。对于接触式自整角机来说，转速太高，会加剧电刷、集电环的磨损，导致寿命下降，可靠性降低。一般规定最高连续工作转速应在励磁频率下同步转速的 1/20 以下，对中频自整角机来说则为 1200r/min 以下。

4) 最高转速的选择。自整角机的最高转速是指短期内允许的极限转速，一般应控制在 4000r/min 以下。此时，即使接收机不带负载，往往要滞后于发送机 10°左右，电流也比低速运转时大，加速了电刷、集电环的磨损，故只允许短时间在此转速下运行。

5) 发送机并接接收机台数的选择。实际应用中，经常遇到要将一个信号传输到几个不同的地方，这就需要 1 台发送机和多台接收机连接使用。1 台发送机和 n 台同型号接收机并联运行时，每台接收机的比整步转矩随并联台数的增加而减小[$T = 2T_{0F}T_{0J}/(T_{0F} + nT_{0J})$]，如果是同参数的发送机接收机，则每台接收机的比整步转矩仅为成对运行时的 $2/(1+n)$ 倍，接收误差增大，系统精度下降，因此，必须限制并联工作接收机的台数，或选用比整步转矩较大的大机座号发送机，使接收机的比整步转矩不致下降太快。

多台接收机并联运行时应保证并联接收机参数的一致性，否则会对系统产生不良影响。如若一台接收机的摩擦力矩增大，除自身的指示精度下降外，还要影响所有接收机的指示精度。若各接收机的参数有差异，则在各接收机回路中产生环流，引起自整角机发热，特别是发送机的温度迅速提高。根据经验可知，工作接收机的台数应满足两个条件：组合后接收机的比力矩应不小于接收机本身固有比力矩的2/3，即 $T \geqslant 2T_{0J}/3$；发送机的比整步转矩必须大于接收机比整步转矩的 $n/2$ 倍，即 $T_{0F} \geqslant nT_{0J}/2$。

6) 远距离传输。当发送机和接收机相距甚远，线路上的电压降落使得两者励磁电压的相位和大小发生变化，使两者整步绕组的电动势大小和相位产生差异，影响系统的工作。为了减少这种影响，可从线路上采取措施：较远端自整角机并联电容器或由升压变压器供给励磁，补偿线路的压降，也可以给较近端的自整角机串联一个和长线相当的阻抗。若发送机和接收机定子间以长线连接，三根连接线必须电阻相等。

(2) 控制式自整角机的选用

1) 频率和转速的选择。当控制式发送机旋转时，定子绕组切割转子磁通，产生速度电动势 E_{VF}，在发送机和变压器的定子上建立了附加磁场，变压器转子中则感应出速度电动势 E_{VR}，它随转速增高而增大，时间相位也在发生变化。如 50Hz 自整角机，速度电动势 E_{VR} 的时间相位在低速（300r/min 以下）时基本与变压器输出电压同相位，可将变压器转子旋转一小角度来抵消，使系统重新协调，仅产生电气误差。而在高速（如 3000r/min）时其相位可与变压器输出电压正交，产生很大的无法消除的基波零位电压，使伺服系统中的伺服放大器饱和，系统的灵敏度降低，因此工频控制式自整角机的转速不能接近同步转速(3000r/min)。若采用 400Hz 自整角机，同步转速较高，上述影响可大大减小。

2) 1 台控制式自整角发送机并接自整角变压器的最多台数。由控制式自整角机组成的伺服系统，也经常要将一个角度信号传输到几个不同的地方，同样存在由 1 台控制式发送机和多台自整角变压器并联运行的情况。和力矩式自整角机系统相仿，1 台控制式发送机并接变压器的最多台数，也受到一些因素的限制：随着并联工作自整角变压器台数的增多，发送机定子绕组中的电流相应增大，励磁绕组的电流随之增加，使发送机的温升增高，发送机定子绕组中的感应电动势和励磁绕组之间的相位移增大，直接影响自整角变压器输出电压的相位移。并联工作自整角变压器台数的增多，还会使每台自整角变压器的比电压下降，引起角度传输误差的增大。因此 1 台控制式自整角发送机并接自整角变压器的台数多少，应从系统的传输精度及温升两方面来考虑。

2.6.3 故障分析及维护

各种常见故障的原因、故障判定及排除方法分别见表 5.15-4～表 5.15-14。

表 5.15-4 力矩式自整角机指示精度降低原因及排除方法

原 因	故障判定及排除方法
比力矩降低	用微欧计测量阻尼条电阻，如果电阻增大则应重新焊接阻尼条
摩擦力矩增大	测量摩擦力矩及电刷压力。若摩擦力矩过大但电刷压力合适，则可判定摩擦力矩增加是由于电刷集电环间的摩擦系数增大引起的，应抛光电刷、集电环至 R_a0.1 以下。若摩擦力矩过大且电刷压力也很大，则可判定摩擦力矩的增大是由于电刷压力过大引起的，应调整电刷压力。若摩擦力矩增大是由于轴承磨损或润滑油挥发引起的，则应添加 1～2 滴润滑油或更换轴承
接收机接得过多或发送机比整步转矩不够大	核算接收机台数是否合适，若超过允许值，应将多余台数去掉或者改用比整步转矩较大的发送机
定子绕组短路	测量定子三相绕组直流电阻对称性
定子绕组断路	测量定子绕组直流电阻

表 5.15-5　发送机过热原因及排除方法

原　因	故障判定及排除方法
发送机输出电阻过大	选用输出阻抗较小的发送机
定、转子绕组短路	测量励磁电流和绕组直流电阻
接收机接得过多或发送机的比力矩不够大	核算接收机台数是否合适，若超过允许值，应将多余台数去掉或者改用比力矩较大的发送机
接收机负载过大或摩擦力矩骤增	检查接收机所接负载，应排除负载卡住、转动不灵活及接收机摩擦力矩突然增大等异常现象

表 5.15-6　接收机阻尼时间过长，阻尼过程中有小振荡原因及排除方法

原　因	故障判定及排除方法
阻尼条虚焊	用微欧计测量阻尼条电阻，若电阻过大应重焊阻尼条
摩擦力矩过小	测量摩擦力矩，调整电刷压力使之符合要求
转子转轴与轴承内孔以及轴承室与轴承外径的配合过松	由于电机使用过久会产生此现象。可在轴伸端加上径向力，用千分表测径向间隙

表 5.15-7　接收机爬行原因及排除方法

原　因	故障判定及排除方法
电刷、集电环间的摩擦力矩过大	测量摩擦力矩及电刷压力，若摩擦力矩过大是由于电刷压力过大所引起的，则应调整电刷压力使摩擦力矩符合要求
电刷、集电环间摩擦力矩不均匀	测量摩擦力矩，若摩擦力矩不均匀则应清除电刷集电环间的污物或抛光电刷与集电环
轴承摩擦力矩过大或不均匀	打开接线板并取下电刷，测量电机的摩擦力矩。若摩擦力矩过大或不均匀，加 1～2 滴润滑油再测

表 5.15-8　噪声过大原因及排除方法

原　因	故障判定及排除方法
轴向间隙过大（一般由于使用过久引起）	电机轴向加适当力，用千分表测量轴向间隙，若轴向间隙过大，可取下轴承挡圈，加放适当调整垫圈使之达到要求
定、转子铁心间隙不均匀（一般由于使用过久引起）	在轴伸端加适当的径向力，用千分表测量轴伸径向跳动
定、转子绕组短路	根据励磁电流及励磁功率及电机发热等情况判断绕组是否短路
接收机负载过大	检查接收机指针及传动机的转动是否灵活，有无卡住现象，失调角是否过大，并排除这些故障

表 5.15-9　力矩式接收机的转向相反原因及排除方法

原　因	故障判定及排除方法
接线错误	检查接线正确性

表 5.15-10　力矩式接收机出现两个零位原因及排除方法

原　因	故障判定及排除方法
定子一相断路	用万用表检查定子绕组

表 5.15-11　控制式变压器比电压降低原因及排除方法

原　因	故障判定及排除方法
电刷集电环接触不良，引起接触电阻太大	用电桥测量电刷集电环间的接触电阻，若接触电阻过大，可用绸布蘸上酒精除去污物或用抛光办法使接触电阻减小
控制式变压器并联台数过多	核算并联台数，去掉多接的控制式变压器
定、转子绕组短路	检查空载电流、空载功率及电机发热情况

表 5.15-12　控制式变压器的同步传动误差增加原因及排除方法

原　因	故障判定及排除方法
转速过快	检查电机的工作转速，其数值应低于同步转速，例如：50Hz 电机的工作转速应小于 3000r/min。或采用频率较高的 400Hz 电机

表 5.15-13　控制式发送机的精度下降及零位电压增大原因及排除方法

原　因	故障判定及排除方法
安装工具与电机止口的配合过松	检查安装工具与电机止口的配合情况，若配合过松应更换安装工具
安装后电机轴及机壳受力过大	检查安装情况，正常情况下电机轴及机壳应不受力或少受力，否则应更换安装工具
电机严重碰撞而变形	检查机壳、止口、端盖及轴伸

表 5.15-14　电刷集电环接触不良、跳火原因及排除方法

原　因	故障判定及排除方法
电刷变形不与集电环接触	检查电刷接触情况，若与集电环脱离接触，应调整电刷使其压力保持 2～5g 左右（取值随机座号增大而增大）。若电刷位于两集电环间的绝缘上，则应拨正电刷使之位于集电环的正中位置
电刷集电环表面粗糙（由于使用过久造成）	电刷、集电环表面粗糙度一般应在 $R_a0.1$ 以下。若已磨损不光滑，先用绸布裹上抛光膏（粒度约 W1.5）进行粗抛光，再用绸布（或鹿皮）裹上玉石粉蘸以酒精进行精抛光至 $R_a0.1$ 以下
轴承内润滑油污染集电环	目检电刷、集电环表面，若有黑色污物，即为磨损的金属基微粒与润滑油的混合物。应用绸布蘸以酒精仔细擦净，必要时应抛光
电刷压力不均匀，与集电环接触时断时续，严重时发生跳火烧毁电刷	若信号时断时续即是要发生跳火烧毁电刷的先兆，此时应立即检查电刷接触情况，调整电刷压力并正确置于集电环正中位置

2.7 典型产品技术数据

典型产品技术数据见表 5.15-15～表 5.15-21。

表 5.15-15 控制式自整角发送机典型数据

序号	型号	励磁电压 (V)	频 率 (Hz)	最大输出电压 (V)	励磁电流 (mA)	励磁功率 (W)	外形结构 GB 7346	机身长度 (mm)
1	12ZKF41	20	400	9	100	0.4	K1	35
2	12ZKF42	26	400	12	60	0.4	K1	35
3	20ZKF42	26	400	12	34	1.0	K3	40
4	20ZKF43	36	400	16	65～100	1～1.5	K3	40
5	28ZKF42	26	400	12	130	0.45	K3	50
6	28ZKF43	36	400	16	60～180	0.5～1.5	K3	50
7	28ZKF44	115	400	16	30～50	0.6～1.5	K3	50
8	28ZKF45	115	400	90	30～50	0.6～1.5	K3	50
9	36ZKF44	115	400	16	100	2.0	K1	60
10	36ZKF45	115	400	90	60～140	2.9～2.5	K3	60
11	36ZKF53	36	50	16	40～50	1.2～2.0	K3	60
12	36ZKF56	110	50	90	22	0.8	K3	60
13	45ZKF44	115	400	16	100	2.0	K3	75
14	45ZKF45	115	400	90	60～200	1.2～2.5	K3	75
15	45ZKF56	110	50	90	42	2.0	K3	75
16	55ZKF45	115	400	90	245	3.0	K4	100
17	55ZKF56	110	50	90	89	2.0	K4	100
18	70ZKF45	115	400	90	950	9.0	K4	120
19	70ZKF56	110	50	90	191	3.0	K4	120
20	90ZKF45	115	400	90	1000	8.5	K4	130

表 5.15-16 控制式差自整角发送机典型数据

序号	型号	励磁电压 (V)	频 率 (Hz)	最大输出电压 (V)	励磁电流 (mA)	励磁功率 (W)	外形结构 GB 7346	机身长度 (mm)
1	12ZKC42	12	400	12	44	0.2	K1	35
2	20ZKC42	12	400	12	80	0.5	K3	40
3	20ZKC43	16	400	16	50～160	0.6	K3	40
4	28ZKC43	16	400	16	30～230	0.3～1.0	K3	50
5	28ZKC44	90	400	90	25～50	0.6	K3	50
6	36ZKC44	90	400	90	45～120	0.8～1.5	K3	60
7	36ZKC53	16	50	16	50	0.6	K3	60
8	36ZKC54	90	50	90	38	0.6	K3	60
9	45ZKC44	90	400	90	80～320	1.0～3.0	K3	75
10	45ZKC54	90	400	90	35	1.5	K3	75
11	55ZKC44	90	400	90	285	6.0	K4	100
12	55ZKC54	90	50	90	90	1.7	K4	100
13	70ZKC54	90	50	90	725	7.7	K4	120
14	90ZKC44	90	400	90	1248	1.7	K4	130
15	90ZKC54	90	50	90	375	3.0	K4	130

表 5.15-17 控制式自整角变压器典型数据

序号	型号	励磁电压 (V)	频 率 (Hz)	最大输出电压 (V)	励磁电流 (mA)	励磁功率 (W)	外形结构 GB 7346	机身长度 (mm)
1	12ZKB42	12	400	10	75	0.05	K1	35
2	20ZKB43	12	400	26	23	0.06	K3	40
3	20ZKB44	16	400	32	40～100	0.06～0.3	K3	40
4	28ZKB43	12	400	26	86	0.2	K3	50
5	28ZKB44	16	400	32	15～150	0.2～0.5	K3	50

续表

序号	型号	励磁电压 (V)	频　率 (Hz)	最大输出电压 (V)	励磁电流 (mA)	励磁功率 (W)	外形结构 GB 7346	机身长度 (mm)
6	28ZKB45	16	400	58	150	0.3	K3	50
7	28ZKB46	90	400	58	10～50	0.3～0.5	K3	50
8	36ZKB45	16	400	58	275	0.6	K3	60
9	36ZKB46	90	400	58	10～150	0.5～3.0	K3	60
10	36ZKB54	16	50	32	46	0.5	K1	60
11	36ZKB56	90	50	58	13	0.3	K3	60
12	45ZKB46	90	400	58	10～160	0.3～2.0	K3	75
13	45ZKB56	90	50	58	17～35	0.7～1.2	K3	75
14	55ZKB46	90	400	58	6～400	0.06～3.0	K4	100
15	55ZKB56	90	50	58	22	0.5	K4	100
16	90ZKB46	90	400	58	700	6.0	K4	130

表 5.15-18　　力矩式自整角机典型数据

序号	型号	励磁电压 (V)	频率 (Hz)	最大输出电压 (V)	励磁电流 (mA)	励磁功率 (W)	比整步力矩 [mN·m/(°)]	外形结构 GB 7346	机身长度 (mm)
1	20ZLJ42	26	400	12	120	0.8	0.03	K3	40
2	20ZLJ43	36	400	16	145	1.0	0.03	K3	40
3	28ZLJ42	26	400	12	280	1.5	0.06	K3	50
4	28ZLJ43	36	400	16	300	2.0	0.06	K3	50
5	28ZLJ44	115	400	16	100	2.0	0.06	K3	50
6	28ZLJ45	115	400	90	60～100	1.0～2.0	0.12～0.25	K3	50
7	36ZLJ42	26	400	12	225	1.5	0.06	K3	60
8	36ZLJ44	115	400	16	250	4.0	0.25	K3	60
9	36ZLJ45	115	400	90	200～250	3.0～4.0	0.25	K3	60
10	36ZLJ56	110	50	90	100	4.0	0.15	K3	60
11	45ZLJ45	115	400	90	550	8.0	0.80	K3	75
12	45ZLJ56	110	50	90	100～200	4.0～7.0	0.3～0.5	K3	75
13	45ZLJ57	220	50	90	55	4.5	0.3	K3	75
14	55ZLF45	115	400	90	500～900	8.0～11.0	1.25～2.0	K4	100
15	55ZLJ56	110	50	90	250	5.5	1.1	K4	100
16	55ZLJ57	220	50	90	125	6.0	1.1	K4	100
17	70ZLJ45	115	400	90	1700	16.0	5.0	K4	120
18	70ZLJ56	110	50	90	500	8.0	3.0	K4	120
19	70ZLJ57	220	50	90	250	8.5	3.0	K4	120
20	90ZLJ45	115	400	90	2200	22.0	8.0	K4	130
21	90ZLJ56	110	50	90	850	10.0	8.0	K4	130
22	90ZLJ57	220	50	90	450	11.0	8.0	K4	130

表 5.15-19　　力矩式差动自整角发送机典型数据

序号	型号	励磁电压 (V)	频率 (Hz)	最大输出电压 (V)	励磁电流 (mA)	励磁功率 (W)	比整步力矩 [mN·m/(°)]	外形结构 GB 7348	机身长度 (mm)
1	28ZCF43	16	400	16	600～650	2.0～2.7	0.025～0.03	K3	50
2	28ZCF44	90	400	90	110	2.0	0.025	K3	50
3	36ZCF44	90	400	90	170～300	2.0～3.0	0.10～0.15	K3	60
4	45ZCJ44	90	400	90	320～600	2.6～8.0	0.35～0.58	K3	75
5	45ZCF54	90	50	90	200	5.0	0.300	K3	75
6	55ZCJ44	90	400	90	866	7.0	0.130	K4	100

续表

序号	型号	励磁电压 (V)	频率 (Hz)	最大输出电压 (V)	励磁电流 (mA)	励磁功率 (W)	比整步力矩 [mN·m/(°)]	外形结构 GB 7346	机身长度 (mm)
7	55ZC[54	90	50	90	300	5.5	0.300	K4	100
8	70ZC[44	90	400	90	190	11.0	4.200	K4	120
9	70ZC[54	90	50	90	780	12.0	2.000	K4	120
10	90ZC[54	90	50	90	1200~2050	14~16	4.0~7.8	K4	130

表 5.15-20 ND、NS、NED、DN、DI、SS、TS 型接触式自整角机典型数据

序号	型 号	励磁电压 (V)	频 率 (Hz)	最大输出电压 (V)	励磁电流 (A)	励磁功率 (W)	比整步力矩 [mN·m/(°)]	最大整步转矩 (mN·m)
1	ND-404	110	50	50	0.28	8	—	—
2	NS-404	110	50	50	0.28	8	1.0	54
3	ND-404P	110	400	100	1.3	18	—	—
4	ND-414	110	50	55	0.5	12	—	—
5	ND-414B	110	50	150	0.5	12	—	—
6	ND-501	110	50	57	0.7	13	—	—
7	ND-501B	110	50	150	0.7	13	—	—
8	DN-500	127	50	57	0.6	12	—	—
9	ND-511	110	50	57	1.0	15	—	—
10	ND-511A	127	50	57	0.8	15	—	—
11	ND-521	110	50	57	1.3	22	—	—
12	NS-501	110	50	55	0.75	15	5.0	255
13	NED-101	50	50	—	—	—	0.6	29.5
14	NED-101B	150	50	—	—	—	0.4	24.5
15	NED-101P	100	400	—	—	—	1.0	640
16	NED-501	57	50	—	—	—	3.4	250
17	NED-501B	150	50	—	—	—	1.7	122.5
18	DI-150	110	500	47	0.3	4.4	—	—
19	SS-150	110	500	47	0.19	2.8	—	12.7
20	DI-153	110	500	47	0.3	4.4	—	—
21	SS-153	110	500	47	0.19	2.8	—	15.7
22	DI-501	110	50	55	0.7	15	—	—
23	DI-511	110	50	57	1.0	18	—	—
24	DI-404	110	50	50	0.42	13	—	—
25	SS-404	110	50	50	0.42	13	0.4	22
26	SS-404M	110	50	50	0.42	13	0.4	22
27	DI-414	110	50	57	0.65	20	—	—
28	DI-454	220	500	58	0.315	11	—	—
29	SS-454	220	500	58	0.315	11	0.3	16
30	SS-405	110	50	53	0.13	7.5	—	—
31	TS-405	77	50	87	0.135	—	—	—

表 5.15-21 BS、BD 型无接触式自整角机典型数据

序号	型 号	励磁电压 (V)	频 率 (Hz)	最大输出电压 (V)	励磁电流 (A)	励磁功率 (W)	比整步力矩 [mN·m/(°)]	最大整步转矩 (mN·m)
1	BD-404A	110	50	49	0.4	12.5	—	—
2	BS-404A	110	50	49	0.4	12.5	0.44	23.5
3	BD-404B	110	50	150	0.4	12.5	—	—
4	BS-404B	110	50	150	0.4	12.5	0.39	20.6

续表

序号	型　号	励磁电压 (V)	频　率 (Hz)	最大输出电压 (V)	励磁电流 (A)	励磁功率 (W)	比整步力矩 [mN·m/(°)]	最大整步转矩 (mN·m)
5	BS-405	110	50	35	0.09	2.0	—	—
6	BD-404P	110	400	100	0.9	23	—	—
7	BS-404P	110	400	150	0.4	12.5	0.64	—
8	BD-500	127	50	55	0.6	20	—	—
9	BS-500	127	50	55	0.6	20	1.18	78.4
10	BD-501A	110	50	55	1.2	25	—	—
11	BS-501A	110	50	55	1.2	25	3.14	176.4
12	BD-501B	110	50	150	1.2	25	—	—
13	BS-501B	110	50	150	1.2	25	314	176.4

3　旋转变压器

早期的旋转变压器用于解算装置中，作为模拟计算机的主要组成部分之一。其输出是随转子转角作某种函数变化的电气信号，通常是正弦、余弦、线性函数。在对绕组作专门设计时，也可产生某些特殊函数的电气输出，用于特殊的场合。随着电子技术和数字计算技术的发展，数字式计算机早已代替了模拟式计算机，旋转变压器目前主要用于位置伺服控制系统中。

3.1　分类

旋转变压器有多种分类方法，按有无电刷和集电环之间的滑动接触来分，可分为接触式和无接触式，在无接触式中又可分为有限转角旋转变压器（环形分装式的旋转变压器）和无限转角旋转变压器（变压器耦合式或复合磁路式的无接触旋转变压器）；按极对数来分，可分为单对极、多极和双通道旋转变压器，通常所说的旋转变压器指单对极接触式旋转变压器；按其用途来分，可分为用于解算装置的旋转变压器和用于数据传输系统的旋转变压器；感应移相器作为旋转变压器的一种特殊工作方式，其输出电压幅值恒定、相位与转子转角呈线性函数关系。

3.1.1　计算用旋转变压器

计算用旋转变压器分为四种基本型式：

1）正余弦旋转变压器（XZ）。当旋转变压器一次绕组施加单相交流电压时，其二次绕组的两个输出电压的幅值分别与转子转角呈正弦和余弦关系。

2）线性旋转变压器（XX）。它是在一定工作转角范围内，其输出电压的幅值与转子转角呈线性函数的一种旋转变压器。它可通过改变正余弦旋转变压器的定、转子绕组的连接方式、绕组的特殊设计来实现；另外还有两种常用线性旋转变压器、单绕组旋转变压器 XDX（线性感应电位计）和微动同步器（微转角线性旋变）。

3）比例式旋转变压器（XL）。将输入电压与输出电压准确地调整到一定比例关系。比例式旋转变压器就是在正余弦旋转变压器或其他旋转变压器的转子上增加一个锁紧装置，使输出电压与输入电压保持固定、精确的比例关系。在系统中，当前级装置的输出电压与后级装置所需要的输入电压不匹配时，可在两者之间加入比例式旋转变压器进行调整。

4）特殊函数旋转变压器（XT）。在一定工作转角范围内，输出电压与转子转角按用途呈一定的函数关系（正割、倒数、弹道、圆函数、对数等）。

3.1.2　数据传输用旋转变压器

数据传输用旋转变压器与控制式自整角机功能相同，也称为四线自整角机。同样包括旋变发送机（XF）、旋变差动发送机（XC）与旋变变压器（XB）三种类型，使用在精度要求较高的系统中。在电气原理和结构上与正余弦旋转变压器完全相同，彼此都兼有对方的功能，一般情况下可以互相通用，一机多用。

3.1.3　无接触旋转变压器

无接触旋转变压器按照用途的不同分为四种基本类型：无接触正余弦旋转变压器（XZW）、无接触旋变发送机（XFW）、无接触旋变变压器（XBW）、无接触旋变差动发送机（XCW）。

3.1.4　感应移相器

感应移相器也可分为接触式和无接触式；按极对数分为单对极、多极和双通道感应移相器；按励磁电源的相数分为单相、两相、三相感应移相器；按结构分为分装式（环形）、组装式（电机式）、通孔组装式（大内孔组装式）感应移相器；按输入绕组有无补偿绕组分为反馈补偿绕组式和无反馈补偿绕组式。目前国内使用最多的是单相感应移相器（YG）、单相无接触感应移相器（YW）、单相双通道感应移相器（YS）。

3.2　结构

旋转变压器的结构类似于两相线绕式异步电机，如图 5.15-17 所示，旋转变压器定、转子铁心是采用高磁导率的铁镍软磁合金或硅钢片经冲制、绝缘、叠压而成。定、转子铁心上分别布置两套参数相同、空间互相垂直的两相正交绕组，以提高旋转变压器的精度。转子绕组通过集电环、电刷引出。和自整角机一样均为封闭式结构，这样可防止因机械撞击及电刷、集电环污染而造成的接触不良，以免影响其性

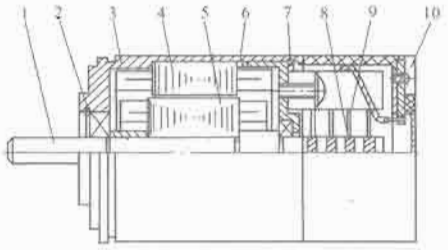


图 5.15-17　旋转变压器结构图

1—转轴；2、7—挡圈；3—机壳；4—定子；5—转子；6—波纹垫圈；8—集电环；9—电刷；10—接线柱

能。小机座号的旋转变压器采用“一刀通”结构，即定子铁心、轴承室孔为同一尺寸，保证了定、转子的同轴度，有利于电机精度的提高。

无接触式旋转变压器，有一种是将转子绕组引出线做成弹性卷带状，这种转子只能在一定的转角范围内转动，称为有限转角的无接触式旋转变压器；另一种型式是转子绕组通过环形变压器从定子上引出，即用环形变压器替代传统的电刷和集电环，实现无接触。这种无接触式旋转变压器的转子转角不受限制，结构和无接触自整角机基本相同。

3.3 工作原理

旋转变压器的工作原理与普通变压器的相似，只是普通变压器的一次绕组和二次绕组是相对固定的，其输出电压与输入电压之比为常数，而旋转变压器的一次绕组和二次绕组是分别置放在定子和转子上的，所以旋转变压器可以看作一次绕组和二次绕组之间的电磁耦合随着转子转角变化而变化的变压器，输出电压与转子转角保持某种函数关系。

3.3.1 正余弦旋转变压器的工作原理

图 5.15-18 是正余弦旋转变压器的电气原理图，图中一次绕组为参数相同、空间互相垂直两相定子绕组 S1S3 和 S2S4，二次绕组为参数相同、空间互相垂直两相转子绕组 R1R3 和 R2R4。若在定子绕组 S1S3 上施加交流励磁电压 U_{S1}，转子从基准电气零位逆时针转过 θ，则在转子绕组 R1R3 和 R2R4 中产生的感应电压分别为

$$\left.\begin{aligned} U_{R1} &= K_u U_{S1}\cos\theta \\ U_{R2} &= -K_u U_{S1}\sin\theta \end{aligned}\right\} \tag{5.15-5}$$

式中，K_u 为电压比。

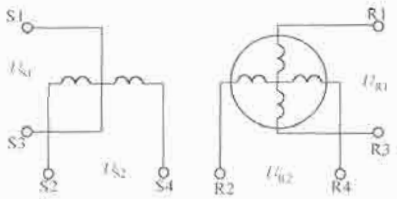


图 5.15-18 正余弦旋转变压器电气原理图

同理若在定子绕组 S2S4 上施加交流电压 U_{S2}，则在转子绕组 R1R3 和 R2R4 中产生的感应电压分别为

$$\left.\begin{aligned} U_{R1} &= K_u U_{S2}\sin\theta \\ U_{R2} &= K_u U_{S2}\cos\theta \end{aligned}\right\} \tag{5.15-6}$$

若在定子绕组 S1S3 和 S2S4 同时分别施加交流电压 U_{S1} 和 U_{S2}，则在转子绕组 R1R3 和 R2R4 中产生的感应电压分别为

$$\left.\begin{aligned} U_{R1} &= K_u U_{S1}\cos\theta + K_u U_{S2}\sin\theta \\ U_{R2} &= K_u U_{S2}\cos\theta - K_u U_{S1}\sin\theta \end{aligned}\right\} \tag{5.15-7}$$

若转子绕组励磁，定子绕组输出，同样可以得出与转子转角成正余弦函数关系的输出电压。

当输出绕组接有负载时，就有电流通过输出绕组并产生电枢反应磁通，使旋转变压器气隙中磁场发生畸变。这时输出电压就不再是转子转角的正弦函数，而有一定偏差。为了减少这种偏差，旋转变压器在工作时，要求交轴绕组短接（一次侧补偿），或在两相输出绕组接以对称负载（二次侧补偿）。为了提高旋转变压器的精度，其负载阻抗应尽可能大，而且通常采用原、副方同时补偿。

3.3.2 线性旋转变压器的工作原理

如图 5.15-19 所示，若将正余弦旋转变压器一次的励磁绕组与二次的余弦绕组串联后施以额定励磁 U_f，正交绕组短路。可以得出正弦绕组的输出电压满足式（5.15-8）的函数关系。

$$U_{R1} = K_u U_f \frac{\sin\theta}{1 + K_u\cos\theta} \tag{5.15-8}$$

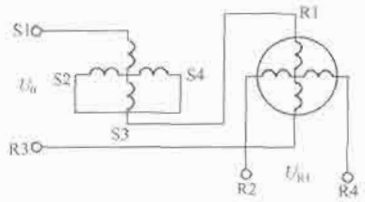


图 5.15-19 线性旋转变压器工作原理图

通过计算可知，当电压比 $K_u = 0.5$ 时可以使转子转角在±37.4°范围内，其输出电压和转子转角的关系与理想直线相比较，误差不会超过±0.1%；如果将电压比提高到 0.56 左右时，在±60°转角范围内输出电压和转子转角呈线性关系。

3.3.3 比例式旋转变压器的工作原理

比例式旋转变压器具有能把励磁电压和输出电压准确地调整到一定比例关系的功能。其电气原理与正余弦旋转变压器相同，只是在转子上增加一个锁紧装置，当把转子转到合适位置后锁定，U_{R1} 与 U_{S1} 之间即保持固定、精确的比例关系，在系统中，当前级装置的输出电压与后级装置所需要的输入电压不匹配时，可在前、后级装置之间插入比例式旋转变压器，以前级装置的输出电压作为比例式旋转变压器的励磁电压，调整转子转角至适当位置，即可输出后级装置所需要的输入电压。

3.3.4 无接触旋转变压器的工作原理

无接触旋转变压器具有一个或两个环形变压器，如图 5.15-20 所示，环形变压器的转子绕组与旋转变压器的转子绕组直接相连。当环形变压器的定子绕组通入交流电时，在环形变压器的转子绕组中就产生感应电动势，其大小与转子转角无关，此电动势施加在旋转变压器的转子绕组上，即为旋转变压器的励磁电压，从而形成无刷结构。也可以将旋转变压器作为输入方，环形变压器作为输出方，其原理相同。按用途的不同，分为如图 5.15-20 所示的四种工作方式。

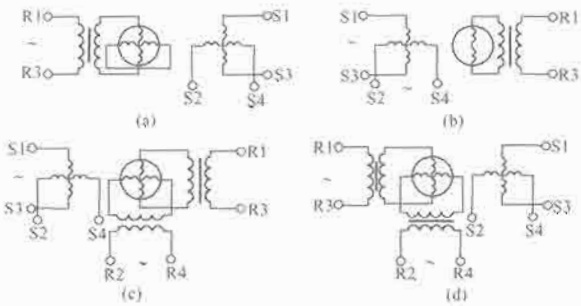


图 5.15-20 无接触旋转变压器的四种工作方式

(a) XFW 型；(b) XBW 型；(c) XZW 型；(d) XCW 型

3.3.5 单绕组线性旋转变压器的工作原理

单绕组线性旋转变压器又称为线性感应电位计，转子结构类似于自整角机的凸极转子，转子上布置单相集中绕组作为励磁绕组，定子结构与正余弦旋转变压器相似，其上布置单相同心式绕组作为输出绕组。当转子绕组施加励磁电压后，在其转子中产生脉振磁通由于定子、转子之间的互感与转角成正比，则当励磁绕组和输出绕组轴线垂直时，其间互感为零，输出绕组中的感应电动势也为零，当转子转过 θ 角

后，感应电动势也与转角 θ 成正比。

单绕组线性旋转变压器的特点是：输出电压的相位移不随转子转角变化、输出电压梯度（电压比）和线性范围可根据需要设计。这是正余弦旋转变压器改变接线的线性旋转变压器所不具备的。单绕组线性旋转变压器主要在 20#、28# 小机座号上采用，线性范围为 0°～90°，线性误差为 0.2%～1%。

3.3.6　感应移相器的工作原理

感应移相器是正余弦旋转变压器的一种特殊应用，主要特点是输出电压的幅值恒定，而相位与转子转角呈线性关系。正余弦旋转变压器可作为单相和两相两种励磁的移相器使用。

1）单相感应移相器。将正余弦旋转变压器作为单相感应移相器使用，电气原理图如图 5.15-21 所示。

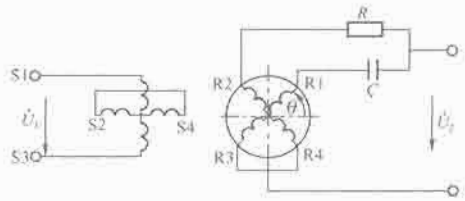


图 5.15-21　单相感应移相器电气原理图

若略去旋转变压器定、转子绕组的漏阻抗，调整移相电阻 R 的大小，使 $2\pi fCR=1$，则输出电压为

$$\dot{U}_2 = \frac{K_u U_f}{\sqrt{2}} e^{j(\theta-45°)} \tag{5.15-9}$$

式中，K_u 为旋转变压器的电压比。

若电阻 R 与电容 C 位置互换，则输出电压的相位移在时间相位上滞后励磁电压（$\theta-45°$）的相角。若转子绕组励磁，定子绕组输出，同样可以得出输出电压的相位移与转子转角呈线性关系。

2）两相感应移相器。若在正余弦旋转变压器的两相输入绕组 S1S3、S2S4 上，施加两相正交电压，则输出绕组上输出电压为

$$\begin{aligned} U_{R1} &= K_u U_f \sin(\omega t \pm \theta) \\ U_{R2} &= K_u U_f \cos(\omega t \pm \theta) \end{aligned} \tag{5.15-10}$$

这种移相器需要时间相位上严格相差 90°的两相励磁电源，只有在精度要求很高的场合才使用。

3.4　主要技术指标和参数

3.4.1　电气参数

1）额定励磁电压 U_f 和频率 f　对于作为角度传输数据用的旋转变压器，其额定励磁电压（常用 26V、36V、60V、115V）和频率（常用 400Hz、1kHz、2kHz）一般都是固定的。感应移相器的励磁电压往往可在额定值的 −20%～40% 之间变化，对其相位误差影响不大。感应移相器的使用频率比较宽，从几十赫兹到几百千赫，根据实际使用要求，国家标准将频率分为 14 个等级：50Hz、135Hz、270Hz、400Hz、1kHz、2kHz、4kHz、10kHz、20kHz、40kHz、75kHz、150kHz、300kHz，另外航海测距系统中还常用一种频率为 80.9kHz 的感应移相器。感应移相器除在额定频率下使用外，还可以在一定频率范围内使用。一般来说将频率等级提高 1～2 个等级使用，不会对相位误差产生很大的影响，但在提高频率使用时，应重新调整移相电阻和移相电容参数，才能获得良好的相位精度。

2）最大输出电压 U_2。指次级绕组感应的最大电压，有时以测量电压比来代替。所谓电压比是指最大输出电压的基波分量与励磁电压的基波分量之比。对于感应移相器来说，输出电压是指次级绕组接上移相电阻和移相电容后的输出电压，它的幅值为旋转变压器输出电压的 $1/\sqrt{2}$。对于两相感应移相器则是指次级绕组上所测得的电压，其幅值即为旋转变压器的输出电压。

3.4.2　阻抗参数

1）开路输入阻抗。初级绕组两端励磁，次级绕组开路时的阻抗。在一定的励磁电压下，开路输入阻抗越大，励磁电流越小，所需电源容量也越小。一般为 200～10000Ω。

2）开路输出阻抗。次级绕组两端励磁，初级绕组开路时的阻抗。

3）短路输入阻抗。初级绕组两端励磁，次级绕组短路时的阻抗。

4）短路输出阻抗。次级绕组两端励磁，初级绕组短路时的阻抗。一般为数十至数百欧姆，应与负载阻抗匹配，负载阻抗应为短路输出阻抗的数十倍以上，越高越好。

对于感应移相器，一般只测量开路输入阻抗和短路输出阻抗。开路输入阻抗是指不接移相元件时的旋转变压器的开路输入阻抗。当接上移相元件后，在高频时，开路输入阻抗随转角略有变化，在低频时，几乎不变。短路输出阻抗是指初级绕组两端短路及接上移相元件时在次级绕组两端所测得的阻抗。

3.4.3　函数误差

当正余弦旋转变压器一相输入绕组施加额定励磁电压，另一相输入绕组短接，在不同转子位置时，两相输出绕组的输出电压的实测值和理论值之差与最大输出电压之比 $[\delta_n = (U_\theta/U_{max} - \sin\theta) \times 100\%]$ 就是函数误差，是计算用正余弦旋转变压器的最主要技术指标，它直接影响计算结果的精度。采取同心式正弦绕组型式，函数误差基本都能达到零级品精度（0.05%以下）。

3.4.4　交轴误差

交轴误差是指实际电气零位与理论电气零位之差。在理想情况下，无论是定子还是转子的两相绕组，其轴线都是正交的，实际上由于铁心磁路的不对称，定子铁心、转子铁心的椭圆，偏心，片间短路，绕组分布的不对称和匝间短路等不良因素，都会造成两相绕组轴线的偏离，产生交轴误差。交轴误差也是正余弦旋转变压器精度等级的主要技术指标，正余弦旋转变压器的精度由函数误差和交轴误差中较低的等级来确定。

国家标准及国家军用标准将旋转变压器的交轴误差规定为三个等级：零级品（≤3′）、Ⅰ级品（≤8′）、Ⅱ级品（≤16′）。

3.4.5　电气误差

电气误差是数据传输用旋转变压器在不同转角时，两个输出绕组电压之比所对应的正切（或余切）角度与实际转角之差 $[\delta_D = \arctan(U_{0c}/U_{0s}) - \theta$ 或 $\delta_D = \operatorname{arcctan}(U_{0c}/U_{0s}) - \theta]$。它包括了函数误差、交轴误差、变比误差及阻抗不对称等，反映了旋转变压器的综合精度，它直接影响到角度传输系统的精度。国家标准及国家军用标准将旋转变压器的电气误差规定为三个等级：零级品（≤3′）、Ⅰ级品（≤8′）、Ⅱ级品（≤12′）。

3.4.6　线性误差

线性误差是指线性旋转变压器在线性工作范围内，不同转角时，输出电压的实际值和对应的理论值之差与线性工作范围的极限位置时的理想输出电压 U 之比 $[\delta_L = (U_\theta - U'_\theta) \times$

100%/U]。产生原因除加工不良、导磁材料非线性外，还有设计原理性误差。

国家标准及国家军用标准将线性误差规定为三个等级：正余弦改接线的线性旋转变压器的零级品为（≤±0.05%）、Ⅰ级品为（≤±0.1%）、Ⅱ级品为（≤±0.2%），零级品极难达到，电机精度基本为Ⅰ级品和Ⅱ级品；单绕组线性旋转变压器的零级品为（≤±0.25%）、Ⅰ级品为（≤±0.5%）、Ⅱ级品为（≤±1%）。

3.4.7 零位电压

零位电压指旋转变压器处于电气零位（输出电压基波同相分量为零时的转子位置）时的输出电压。一般为最大输出电压的0.05%～0.3%。由两部分组成：一部分是与励磁电压同频、相位相差90°的基波正交分量（基波），约占零位电压总值的50%～70%；另一部分是频率为励磁电压频率奇数倍的各次谐波分量，这两部分合成为零位电压总值。

3.4.8 相位移

旋转变压器的相位移是指输出电压基波分量与励磁电压基波分量的时间相位之差。我国生产的旋转变压器相位移在2°～12°之间，小机座号旋转变压器相位移大。励磁电压、频率和绕组温度的变化都会引起相位移的变化。

3.4.9 相位误差

相位误差是指输出电压的基波与输入电压的基波之间的相位移与相应的转子实际转角之差，是感应移相器的主要精度指标。

当考虑到感应移相器定、转子绕组的漏阻抗时，移相回路参数满足式（5.15-11）时，输出电压为式（5.15-12）的关系式为

$$R+R_{2k}=\frac{1}{2\pi fC}-X_{2k} \tag{5.15-11}$$

式中，R_{2k}为感应移相器短路输出阻抗Z_{2k}中的电阻部分，X_{2k}为感应移相器短路输出阻抗Z_{2k}中的电抗部分。

$$\dot{U}_2=K_v\dot{U}_1\left[e^{j(\theta+\theta_0)}+j\frac{R_{2k}-X_{2k}}{R+Z_{2k}}\cos\theta\right] \tag{5.15-12}$$

式中，K_v为与感应移相器参数有关的复常数；θ_0为初始转角。

由式（5.15-12）可以看出，当考虑感应移相器定、转子绕组的漏阻抗时，输出电压中增加了与转子转角有关的一部分电压，影响到输出电压的相位移与转子转角的线性关系，产生了相位误差，在设计和使用感应移相器时，要设法消除或减少其影响。而为了消除误差，必须使$(R_{2k}-X_{2k})/(R+Z_{2k})=0$，这就要求$X_{2k}=R_{2k}$，这无论从设计、内在结构还是制造上都有一定困难，势必产生相位误差，对设计所造成的相位误差可在移相回路中采取措施进行补偿。

1）感应移相器运行在较高频率（10kHz以上）时，$X_{2k}>R_{2k}$，可给移相回路电容端串入一个补偿电阻R_b，使得$R_{2k}+R_b=X_{2k}$，实际中常常用到。

2）感应移相器运行在较低频率（4kHz以下）时，$R_{2k}>X_{2k}$，可给移相回路电阻端串入一个补偿电感L_b，使得$X_{2k}+2\pi fL_b=R_{2k}$，由于补偿电感常常是不可调的，所以一般使$X_{2k}+2\pi fL_b>R_{2k}$，产生过补偿，然后再用R_b拉回来，即满足$X_{2k}+2\pi fL_b=R_{2k}+R_b$。

3）还有一种方法就是将R变为可变电阻（电容C、负载阻抗随之改变），加大R，使$(R_{2k}-X_{2k})/(R+Z_{2k})$小于0.1%～0.03%或更小，起到减小相位误差的作用。

除设计原因外，因制造工艺不良造成的偏心、椭圆，使得两相绕组不正交或不对称，电源频率的不稳定，信号失真等也会对相位误差产生影响。

对于两相移相器，两相输入绕组的不正交（夹角为$\pi/2+\varepsilon$）所产生的相位误差为ε弧度，可在接电源的一相绕组中串一个补偿电阻$R_b=\varepsilon Z_0$（Z_0为开路输入阻抗）进行补偿；而不对称［电压比为K、$K(1+\xi)$］所产生的相位误差为$\arctan(\xi/2)$弧度，可在接电源的一相绕组中串一补偿电感$L_b=\varepsilon Z_0/2\pi f$进行补偿；两相电源的不正交、不对称也会产生相位误差。两相输入绕组的不正交、不对称也可用调节两相电源的正交性和对称性进行补偿。

国家标准将感应移相器的相位误差规定为四个等级：零级品（≤±10′）、Ⅰ级品（≤±20′）、Ⅱ级品（≤±30′）、Ⅲ级品（≤±45′，只允许50Hz、300Hz、500Hz时出现）。

3.4.10 幅值误差

幅值误差是指输出电压随转子转角变化值的一半与平均值之比。由于感应移相器输出绕组接上移相电阻电容后，形成单相输出，输入电流与转角有关系，若电源容量不够大，电源输出电压也就是加到感应移相器的输入电压要随转子转角变化，因此移相器输出电压还受到电源电压变化的影响。理论分析表明相位误差的正弦值即为幅值误差，因此一般只测试相位误差，而免测幅值误差。

3.4.11 移相电容

加到感应移相器输出绕组上的电容，决定着感应移相器输出电抗的大小，同时还对相位误差产生影响。

3.5 设计要点

3.5.1 正余弦旋转变压器设计特点

1）一般两相电机要求两相磁场在空间上和时间上都相差90°。旋转变压器的两相绕组虽然在空间上互相垂直，但在大多数应用场合，总是一次侧一相绕组供电，另一相作为补偿绕组，或两相通以同一时间相位的电压；而且二次侧两相绕组亦相互垂直，两相绕组彼此之间无电磁耦合。所以在电磁计算时，应按单相电机来计算。

2）旋转变压器通常在接近空载状态下工作，转子旋转时不会引起一次侧励磁电流有很大的变化，设计时可按定、转子处于最大耦合位置的空载状态进行计算。

3）旋转变压器的负荷较低，一般不进行温升和机械计算，并对损耗计算进行简化。计算损耗的目的是求得有功励磁电流。空载时，一次绕组励磁电流中的有功分量很小，励磁电流很大程度上取决于它的无功分量。为了简化计算，常常给无功分量乘以稍大于1的电流系数，求得励磁电流。实验证明，电流系数随着冲片材料、机座号的大小以及加工条件等的不同而不同，一般在1.001～1.025之间。

4）旋转变压器的短路输出阻抗对负载阻抗的比值越小，输出电压的畸变也越小。因此旋转变压器应具有尽可能小的短路输出阻抗。

5）旋转变压器的主要功用是输出一个与转子转角成正弦或余弦函数关系的电气信号。设计时应从精度出发来选择绕组型式，定、转子齿槽配合，导磁材料及磁通密度等，以保证旋转变压器气隙磁场按正弦规律分布。

① 在旋转变压器中常用的绕组型式有两种，即双层短距分布绕组和同心式正弦分布绕组。双层短距分布绕组也能达到较高的绕组精度并具有良好的工艺性，但是在绕组中还存在一定的谐波磁动势分量，这些谐波磁动势分量的存在会增大其正余弦函数误差，再加上工艺因素所引起的误差，就使旋转变压器的精度提高受到一定限制，因此它只适用于精

度要求不高或者尺寸较大的旋转变压器中。正弦绕组是每相绕组在各槽中的导体数按正弦规律分布的同心式绕组，作为高精度绕组，它可将各次谐波（齿谐波除外）削弱到相当小的程度，从而大大提高旋转变压器的精度。它通常有两种分布型式，绕组轴线对准槽中心线的Ⅰ型绕组和绕组对准齿中心线的Ⅱ型绕组。

② 为布置两相对称绕组，并能消除 ν 次谐波磁动势，其槽数必须是 4ν 的倍数，通常考虑励磁绕组消除 5 次或 7 次谐波磁动势，输出绕组消除 3 次谐波磁动势。为了避免定、转子齿谐波磁动势耦合，定、转子槽数不应成倍数关系，两者之差也不能等于 2。为了消除齿谐波，常在转子上斜一个槽距。

③ 旋转变压器要求导磁材料磁导率高、磁化曲线直线部分的线性度好，饱和磁通密度高，各向均匀性好，比损耗小等。对高空载阻抗的旋转变压器，宜选用饱和磁通密度低的铁镍合金 1J79；对低空载阻抗的旋转变压器，宜选用饱和磁通密度高的铁镍合金 1J50；对低空载阻抗、且励磁电压恒定的旋转变压器，宜选用加工工艺好、成本低、饱和磁通密度高的硅钢片。

3.5.2　线性旋转变压器设计特点

理论上分析，选择合适的旋转变压器电压比，通过改接线，在±60°范围内，可获得精度为±0.071%左右的线性旋转变压器，而要达到零级品（±0.05%）是很困难的，而且由于导磁材料的非线性、加工工艺、磁路等不利因素的影响，Ⅰ级品（±0.1%）的产品也很少，绝大多数为Ⅱ级品（±0.2%）。

为提高线性旋转变压器的线性精度，通常使用 5 次谐波补偿法设计绕组并从工艺、试验上采取措施，大多数产品可达到 1 级品以上。

线性旋转变压器除主要设计指标由函数误差改为线性误差和绕组计算外，其余计算同正余弦旋转变压器，绕组计算步骤为：线性误差计算→选最佳电压比→一次侧基波绕组匝数→二次侧基波绕组匝数→一、二次侧基波绕组系数→5 次谐波补偿幅值→一、二次侧 5 次谐波绕组系数→一、二次侧 5 次谐波绕组匝数→一、二次侧实际 5 次谐波绕组系数→实际 5 次谐波补偿幅值。

3.5.3　无接触旋转变压器设计特点

设计无接触旋转变压器，主要是性能参数的分析计算，首先要根据无接触旋转变压器的开路输入阻抗对环形变压器和旋转变压器进行阻抗匹配方案设计，然后根据所匹配的阻抗对环形变压器和旋转变压器部分分别设计计算，最后再进行联合计算，计算出各阻抗、最大输出电压及相位移等技术指标。

1）旋转变压器部分的设计和接触式旋转变压器一样，冲片可和同机座号的接触式旋转变压器通用，铁心长度可根据需要适当缩短，绕组型式仍为同心式正弦分布绕组。

2）环形变压器轭高和齿宽一般根据等磁通密度原则设计，对超薄型无刷旋转变压器也要考虑到空间位置来确定。为了计算方便，环形变压器的电压比一般为 1，所以可以根据定、转子等窗口面积的原则设计定、转子铁心的内、外径。为了防止铁心本身自成短路环，定、转子铁心要开径向窄槽断开，实验证明，未开槽铁心的励磁电流比开槽铁心的增加 20%～30%。

3）励磁电压和频率等级的选择。无接触旋转变压器的励磁电压和频率除采用部分接触式旋转变压器的等级以外，大多数产品属于低电压、高频率规格，使用于交流伺服系统。

4）阻抗匹配原则。无接触旋转变压器为两级变压器参数匹配，计算比较复杂，旋转变压器设计的最基本参数就是开路输入阻抗，只有确定了两级变压器的各自开路输入阻抗，才能进行设计。根据无接触旋转变压器的等效电路图进行分析，可得到阻抗匹配原则［$Z_{2o} \approx Am_1^2 Z_{1o}$，$Z_{1o} \approx (1+A)Z_o/A$，$A = BC$，$Z_{1o}$ 为一级开路输入阻抗，Z_{2o} 为二级开路输入阻抗，Z_o 为总的开路输入阻抗，m_1 为一级有效匝数比］。无接触旋转变压器的计算应按以下步骤进行：初选一级短路输出阻抗参数 C（0.05～0.8，小机座号、低频率取较大值），确定参数 B（二级开路输入阻抗与一级短路输出阻抗之比，10～20，在工艺允许的情况下尽量取大）→初选一级短路输出阻抗参数 C→计算参数 A→初步确定两级开路输入阻抗→分别进行旋转变压器和环形变压器的设计→计算实际的两级开路输入阻抗值→联合计算。

5）消除电磁干扰。无接触旋转变压器包括环形变压器和旋转变压器两部分磁路。环形变压器磁场干扰磁路旋转变压器磁场，影响旋转变压器精度，因此设计时要合理布置两者磁路，在空间允许的情况下，尽量拉大两者之间距离，必要时采取屏蔽措施。

3.5.4　感应移相器设计特点

1）感应移相器除了要满足正余弦旋转变压器的设计要求外，重要的一点是根据感应移相器的特点，在绕组设计时满足 $X_{2k} = R_{2k}$，此时由本身参数带来的相位误差为零。实际上要使两者完全相等是困难的。一般设计 $X_{2k} > R_{2k}$，为了保证相位误差，可在接电容的一相回路增加补偿电阻 R_b，并满足 $R_b = X_{2k} - R_{2k}$。但在设计频率低于 1000Hz 的小机座号感应移相器时，不可避免地出现 $R_{2k} > X_{2k}$ 的情况，则可在接电阻的一相回路中增加补偿电感 L_b，在接电容的一相回路增加补偿电阻 R_b，并满足 $R_b + R_{2k} = 2\pi f L_b + X_{2k}$。

2）低频率段的感应移相器的磁路计算方法和旋转变压器的磁路计算方法相同，对高频率段（20kHz 以上）的感应移相器的磁场，已不能简单地用集中磁路来代替，需要用电磁场的理论来分析，进行复磁导计算。实际设计时，根据复磁导和定子漏磁导实验曲线，查出复磁导、漏磁导、漏磁纳，初算励磁绕组有效匝数，进行阻抗计算，制造出样机，通过试验分析，进行方案调整。

3.6　试验、选用、故障及维护

3.6.1　试验

（1）相关技术标准

现行技术标准有：

GJB 929A—1998《旋转变压器通用规范》（替代 GJB929A—1989）

GJB 930—1990《感应移相器通用规范》

GJB 1421—1992《无接触旋转变压器通用规范》

GJB 1456—1992《单绕组线性旋转变压器通用规范》

GJB 1652—1993《特殊函数旋转变压器通用规范》

GJB 2550—1995《无刷感应移相器通用规范》

GJB/Z 46.2—1993《军用旋转变压器系列型谱》

GB/T 10241—2007《旋转变压器通用技术条件》

JB/T 5782—1991《单绕组线性旋转变压器通用技术条件》

JB/T 6225—1992《感应移相器通用技术条件》

JB 2660—1980《SVT、LVT、MVT 系列旋转变压器》

（2）阻抗测试

阻抗参数是旋转变压器的重要性能参数，包括 4 个阻抗：开路输入阻抗、短路输入阻抗、开路输出阻抗和短路输出阻抗。不同类型的旋转变压器，有的阻抗参数和旋转角度有关，有的则不发生变化，通常测试的阻抗参数为电气零位时的数值。对于感应移相器，一般只测量开路输入阻抗和短路输出阻抗。测量短路输出阻抗时，两相输入绕组分别短路，输出绕组接上移相的阻容元件，并加以额定输出电压。

（3）函数误差

按图 5.15-22 接线，将被试旋转变压器装在角分度装置上，选用同型号、低阻抗的旋转变压器作为补偿用旋转变压器，将被试旋转变压器的转子角度置于 90°，感应分压器置于 1.00000，调节补偿旋转变压器及移相器的转子位置，使指零仪所指示的与输出方最大耦合电压同相的基波分量为零。将补偿用旋转变压器及移相器的转子固定。依次转动转子角度从 0°～180°，每增加 5°或 10°测一次函数误差。调节分压器的旋钮使指零仪所指示的基波同相分量为零，将感应分压器的读数除以分压器的最大值即为该角度的测量值。该角度的函数误差等于测量值减去理论值再乘以 100 即为最大输出百分数表示的函数误差。将图 5.15-22 中 S1S3 换为 S2S4，R2R4 换为 R1R3，并在 180°位置上重新确定零位，重复上述步骤，测试 180°～360°的函数误差，取两者中绝对值最大者作为旋转变压器的函数误差。

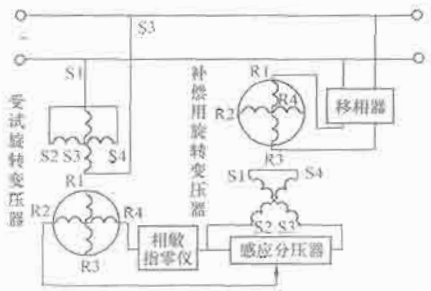


图 5.15-22 函数误差试验接线图

（4）线性误差

采用图 5.15-22 类似的接线，将被试线性旋转变压器装在角分度装置上，励磁并达到通电稳定工作温度后，调节转子到基准电气零位。将感应分压器的旋钮放在 0.90000 的位置上，再将转子转至 0.9L（线性工作范围）位置上，调节补偿旋转变压器和移相器的转子位置，使指零仪的基波同相分量为零且总值最小，然后将补偿旋转变压器及移相器的转子固定，在以后的试验中不再重调。从 $-L$～$+L$ 之间，每隔 $L/10$ 调节一次感应分压器，分压器的实测值与理论值之差乘以 100 即为线性误差，取其中绝对值最大者为线性旋转变压器的线性误差。

（5）交轴误差

将旋转变压器安装在角分度装置上，按表 5.15-22 的规定接线，输出绕组接相敏指零仪。以额定电压对两输入绕组轮流励磁，转动转子使输出电压基波同相分量为零，分别记下转子的电气零位角度，与表 5.15-22 规定的理论电气零位角度的偏差值（A、B、C、D、E、F、G、H），再按表 5.15-23 计算出各位置之角度偏差间的代数差即为交轴误差，取绝对值最大者作为旋转变压器的交轴误差。

（6）电气误差

旋变发送机、旋变差动发送机、旋变变压器的电气误差

表 5.15-22 交轴误差和零位电压试验接线

序号	励磁绕组	输出绕组	理论电气零位角度	交轴偏差代号
1	S1S3（S2S4 短接）	R2R4	0°	A
2		R2R4	180°	B
3		R1R3	90°	C
4		R1R3	270°	D
5	S2S4（S1S3 短接）	R1R3	0°	E
6		R1R3	180°	F
7		R2R4	90°	G
8		R2R4	270°	H

表 5.15-23 交轴误差计算

输出方交轴误差	A-C，B-D，E-G，F-H
励磁方交轴误差	A-G，B-H，C-F，D-E
交轴误差	A-E，B-F，C-G，D-H

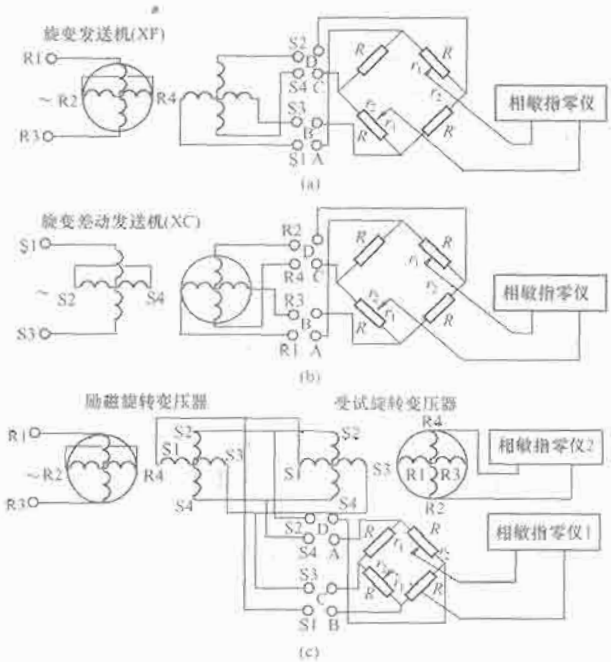


图 5.15-23 电气误差试验线路

（a）XF 型；（b）XC 型转子；（c）XB 型和 XC 型定子

试验线路如图 5.15-23 所示。图中四臂函数电桥的各电阻臂均为 10000Ω 的无感电阻，偏差小于 1Ω，分压器的角度抽头 r_1/r_2 的值与理论值相比，偏差小于 0.005%。受试旋转变压器装夹在分度头上，从基准电气零位开始，每隔 5°测量一次，并由四臂函数电桥给定相应的 r_1/r_2 值，使 $r_1/r_2=\tan\theta$（θ 为理论电气角），转动转子至 θ'，使相敏指零仪所指示的基波同相分量为零。读取机械角度 θ' 与对应的理论电气角度 θ 之偏差，取绝对值最大的误差作为电气误差。

（7）零位电压

按表 5.15-22 的规定测量零位电压的基波值和总值，转动旋转变压器的转子，使相敏指零仪所指示的基波同相分量为零，其正交分量读数就是零位电压的基波分量；保持转子位置不变，非相敏电压表读数为零位电压的总值。

（8）电压比和相位移试验

将受试旋转变压器装在角分度装置上，按表 5.15-24 的规定测出最大耦合位置时的输出电压的基波有效值电压。测量仪器不能对输出绕组开路电压产生大于 0.05%的变化，输出绕组电压对励磁电压之比即为电压比。同理，在最大耦合位置测出输出电压与输入电压基波分量间的相位差，即为输出电压相位移，测量精度应达到±0.1°。

表 5.15-24　　测量电压比的绕组组合

励磁绕组	短路绕组	输出绕组	转子角度	励磁绕组	短路绕组	输出绕组	转子角度
S1S3	S2S4	R1R3	0°	S2S4	S1S3	R2R4	0°
S1S3	S2S4	R2R4	270°	S2S4	S1S3	R1R3	90°

（9）相位误差

感应移相器安装在角分度装置上，首先确定相位零位，再按图 5.15-24 接线，接入规定的移相电容 C、移相电阻 R 和补偿电阻 R_b，然后以额定频率和额定电压励磁，微调 R、R_b，并转动转子使电压表 2 读数恒定或变化最小。再使感应移相器回到相位零位，取下电压表 2。按图 5.15-24 接上倍频器和示波器，从相位零位开始，正向缓慢旋转转子，使示波器上获得如图所示的李沙育图形。记下此时角分度装置的角度，以此点作为试验零位。继续正方向旋转转子约 15°，示波器上的李沙育图形便反转一次，感应移相器转子转动一周，李沙育图形共翻转 24 次。读取各测点机械角度与相应的理论相位角度之偏差，绝对值最大的偏差即为相位误差。

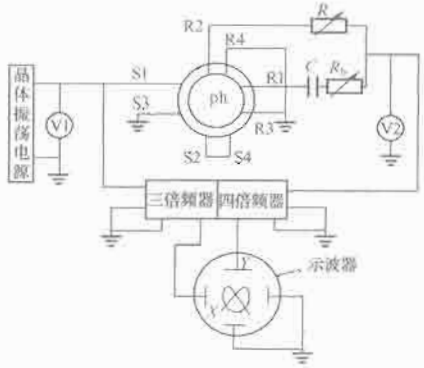


图 5.15-24　相位误差试验接线图

3.6.2　选用

（1）旋转变压器选型

1）根据旋转变压器在系统中的不同功用，选用相应品种，由于大机座号产品的性能受外界环境变化的影响较小，因此在可能范围内优先选用 28# 机座以上的旋转变压器。

2）励磁电源的频率和电压必须和旋转变压器的一致，旋转变压器串联使用时，后级的额定输入电压应与前级的最大输出电压相等。

3）旋转变压器串联使用时，后级的开路输入阻抗应为前级短路输出阻抗值的 20 倍以上，对只给出开路输入阻抗的产品，后级与前级开路输入阻抗的比值应不小于表 5.15-25 的规定值。

表 5.15-25　　前后级旋转变压器的阻抗匹配

机座号	20	28	36	45	55
前级开路输入阻抗/后级开路输入阻抗	$23K_u^2$	$8K_u^2$	$7K_u^2$	$4K_u^2$	$3K_u^2$

4）旋转变压器串联使用时，后级旋转变压器的励磁电压变化范围大，所以在后级应尽量选用铁镍合金铁心的旋转变压器。

5）励磁电压不能超过额定值，否则会使铁心饱和。当励磁电压在额定值范围内变化时，应选用铁镍合金铁心的旋转变压器。

6）当选用正余弦旋转变压器作数据传输用旋转变压器时，要按表 5.15-26 的折算公式计算出相应的电气误差，选择电气误差达到要求的产品。

表 5.15-26　　电气误差推算公式

电气误差推算公式	函数误差 δ_1	交轴误差 δ_2	电压比不对称性 k
	$\sqrt{2}\delta_1\sin(\pi/4-\theta)$	$\delta_2\sin^2\theta$	$[(k-1)\sin2\theta]/2$

（2）感应移相器选型

1）根据使用要求的不同，感应移相器在系统中有不同的功用。测距、测角系统中要求用不同频率的产品，在自动控制系统中作移相、角码转换元件，一般选用 400Hz 和 1000Hz 的产品，而在同步随动系统中选用 400Hz 产品居多。

在选用感应移相器时应考虑到：输入电压和频率与电源电压和频率相近，若两者不同，电源电压允许在 −20%～40%之间变动，电源频率偏离额定频率时，可重新调整移相电阻和补偿电阻，若要提高 1～2 个频率等级使用，应根据式（5.15-13）和式（5.15-14）重新选择移相电容和补偿电阻。

$$R' = \frac{1}{2\pi f' C'} = \frac{1}{2\pi f C} = R \qquad (5.15\text{-}13)$$

$$R'_b = X_{2k}\frac{f'}{f} - R_{2k} \qquad (5.15\text{-}14)$$

2）移相元件和补偿元件对相位误差影响很大。产品出厂时，合格证上的移相电容 C 是标称值，它有 10%左右的误差，为了获得优良的移相精度，使用时应根据移相电容的精度在 R 的标称值附近细调 R，使相位误差最小。

3）感应移相器对电源的要求较严格：电压幅值偏差不大于额定值的±1%，频率偏差不大于额定值的±1%，频率稳定度不劣于 1×10^{-4}，输出波形为正弦波，谐波总值不大于 0.2%。

4）正余弦旋转变压器作单相移相器使用时，可根据其短路输出阻抗确定移相参数。使用频率不能增得太高，降低频率使用时，短路电抗会比短路电阻小很多，必须增加电感补偿。

5）匀速旋转下工作时应选用两相感应移相器。在使用过程中，经常要求感应移相器匀速旋转，分析证明，单相感应移相器在匀速旋转过程中，输出绕组除产生变压器感应电动势外，还产生切割电动势，相位与感应电动势相位不同，产生附加相位误差，影响移相精度。而两相感应移相器在匀速旋转过程中，输出绕组产生的变压器感应电动势和切割电动势，相位相同，只不过幅值增加，故不产生附加相位误差。正余弦旋转变压器作两相移相器使用时，要求一次绕组和电源的对称性、正交性要好。

6）为了提高感应移相器移相的灵敏度，可使用图 5.15-25 所示的倍角移相器，这种感应移相器是以电压 $\dot{U}_2$ 和 $\dot{U}'_2$ 作为比较信号来使用的，两者之间的相位差为转子转角的两倍，所以分辨率较高，输出阻抗较低。

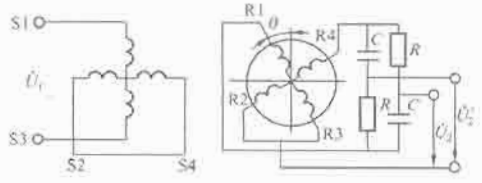


图 5.15-25　倍角移相器电气原理图

3.6.3　故障分析及维护

（1）旋转变压器故障

旋转变压器的常见故障分析及处理见表 5.15-27。

表 5.15-27 旋转变压器的常见故障分析及处理

故障现象	产生原因	判断和处理
励磁电流大，机壳发热或噪声大	输入绕组短路	分别测量两个输入绕组的电阻值是否相等并符合技术条件，若电阻值低于技术条件，该绕组即短路，应更换电机
	输出绕组短路	分别测量两个输出绕组的电阻值是否相等并符合技术条件，若电阻值低于技术条件，该绕组即短路，应更换电机
输出电压为零	输入绕组开路	测量一次绕组的电阻值，若是无限大，则该绕组为开路，应更换电机
	二次绕组开路	测量二次绕组的电阻值，若是无限大，则该绕组为开路，应更换电机
	二次绕组出线端短路	此时励磁电流远超出额定值或有较大噪声，排除短路点后可继续使用
二次输出电压过大	励磁电压过高	检查励磁电压并调整到额定值
	输入绕组匝间短路	此时励磁电流大于额定值，输入绕组电阻小于技术条件规定值，应更换电机
二次输出电压过小	励磁电压过低	检查励磁电压并调整到额定值
	输出绕组匝间短路	一相输入绕组励磁，两相输出绕组开路，缓慢地转动转子并监测励磁电流，若励磁电流变化的幅度很大时，则可判定输出绕组有匝间短路，应更换电机
精度下降	励磁电压过高	检测励磁电压并调整到正常值
	电刷与集电环接触不良	此时个别位置精度严重下降，其他位置正常。可小心调整电刷的位置和压力，使其接触电阻变化符合技术条件要求

(2) 旋转变压器使用注意事项

1) 旋转变压器一相绕组励磁时，另一相绕组应短路或接上一个与励磁电源内阻抗相等的阻抗；两相绕组同时励磁时，输出绕组两相的负载阻抗应尽可能相等。

2) 在系统中安装好旋转变压器后，要调整电气零位，使得系统开始运行前，所有旋转变压器都处于基准电气零位，旋转变压器在出厂前，已在转轴及其靠近转轴的机壳上做好近似基准电气零位标记，使用前要根据近似基准电气零位标记确定准确的基准电气零位。

3) 当旋转变压器负载工作时，输出电压将发生畸变，影响电机精度，应对交轴磁动势进行补偿。一般采用输入方补偿，即一相绕组励磁，另一相正交绕组短接，必要时可采用输入、输出绕组同时补偿。

4) 温度和频率变化将引起旋转电压器电压比和相位移的变化。温度升高，绕组直流电阻增大，相位移近似与直流电阻增长率一样，电压比则随温度升高而降低，但变化比率不大；频率变化导致旋转变压器感抗变化，对相位移影响较大，而对电压比影响较小。计算表明，当频率增大 20%时，相位移约减小 17%，电压比增大 0.7%左右。

(3) 感应移相器故障

感应移相器的常见故障、原因及处理方法见表 5.15-28。

(4) 感应移相器使用注意事项

1) 要小心轻放，不得随意敲击或打开端盖拨弄电刷。

2) 轴伸要用汽油擦干净后安装，若用焊片连接接线板，应将焊片焊好后往接线板上装，不能在接线板上直接焊接，以免使内部引线脱焊。

3) 防止有害气体直接与感应移相器接触。

4) 移相电阻 R、补偿电阻 R_b 要用温度系数小的金属膜电阻，移相电容 C 要用精度高的云母电容或更高级的电容。

3.7 典型产品技术数据

典型产品技术数据见表 5.15-29～表 5.15-36。

表 5.15-28 感应移相器的常见故障分析及处理

故障现象	可能产生的原因	判断和处理
励磁电流过大，移相器发热或有异常交流声	1. 输出绕组匝间短路 2. 移相电容失效，可变电阻放在零的位置 3. 电源电压过大，频率小于额定值很多	1. 测量输出绕组电阻是否符合规定值 2. 检查电容和可变电阻值是否符合要求 3. 测量电源电压是否为额定值，频率是否正确
输出电压随转子转动变化很大或为零	1. R 没有按要求选择 2. 没有 R_b（或 L_b） 3. 输入方正交绕组开路 4. 电刷接触不良	1. 按公式选择 R 2. 按公式选择 R_b 3. 测量正交绕组的电阻并检查是否牢固短接 4. 检查电刷接触是否良好
输出电压不移相	1. 输出方一相绕组开路 2. 输出端接线接错 3. 没有接电容或电容变质	1. 检查输出方是否有开路 2. 纠正不正确接线 3. 接上电容或更换质量好的电容
相位误差大，幅值误差小或反之	1. 输入方正交绕组开路 2. 输入方两相绕组不对称	1. 检查输入正交绕组是否短路良好 2. 检查输入方两相绕组电阻是否对称
相位误差大、相位误差一大一小、相位误差呈二次曲线	1. R、R_b 没按要求选择或没调到最佳值 2. 输入方两相绕组设计不对称 3. 测试仪器不良 4. 移相器制造质量差 5. 输入、输出之间有寄生耦合 6. 示波器失真 7. 输出绕组不对称、不正交 8. R、R_b 没调到最佳值 9. C 变质	1. 按公式选择 R、R_b，并按规定的方法调整 2. 若输入方两相电阻不一致，则调整 R、R_b，保证相位误差，牺牲幅值误差 3. 电源失真大，测试仪器选频能力差，又不稳定 4. 用示波器看，输出波形扭动，输出方绕组两个零点不是相差 180°，零位电压大，应更换电机此时相位误差呈一次曲线，应设法去耦，隔离 5. 检查示波器，并更换或修理 6. 用电压表测两相输出电压，它们大小不等，且不是差 90° 7. 精细调整 R、R_b 8. 更换 C
不返零	1. 装卡不紧 2. 测量仪器相位漂移	1. 重新装卡 2. 转子不动时，也能看到相位漂移

表 5. 15-29　　正余弦旋转变压器典型数据

序号	型　号	励磁方	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	电压比	外形结构 GB 7346	机身长度（mm）
1	12XZ065	定子	20	400	600	0.56	K1	40
2	12XZ0610	转子	20	400	600	1.0	K1	40
3	12XZ1010	定子	20	400	1000	1.0	K1	40
4	20XZ044	转子	26	400	400	0.45	K1	40
5	20XZ045	定子	26	400	400	0.56	K1	40
6	20XZ0410	定子	26	400	400	1.0	K1	40
7	20XZ064	转子	26	400	600	0.45	K1	40
8	20XZ065	定子	26	400	600	0.56	K1	40
9	20XZ0610	定子	26	400	600	1.0	K1	40
10	20XZ104	定子	26	400	1000	0.45	K1	40
11	20XZ105	定子	26	400	1000	0.56	K1	40
12	20XZ107	定子	26	400	1000	0.78	K1	40
13	20XZ1010	定子	26	400	1000	1.0	K1	40
14	20XZ204	定子	26	400	2000	0.45	K1	40
15	20XZ205	定子	26	400	2000	0.56	K1	40
16	20XZ2010	定子	26	400	2000	1.0	K1	40
17	20XZ2510	定子	12	400	2500	1.0	K1	40
18	28XZ041	转子	36	400	400	0.15	K3	50
19	28XZ045	定子	36	400	400	0.56	K3	50
20	28XZ064	定子	36	400	600	0.45	K3	50
21	28XZ065	定子	36	400	600	0.56	K3	50
22	28XZ067	定子	36	400	600	0.78	K3	50
23	28XZ0610	定子	36	400	600	1.0	K3	50
24	28XZ104	定子	36	400	1000	0.45	K3	50
25	28XZ105	定子	36	400	1000	0.56	K3	50
26	28XZ1010	定子	36	400	1000	1.0	K3	50
27	28XZ201	定子	36	400	2000	0.15	K3	50
28	28XZ205	定子	36	400	2000	0.56	K3	50
29	28XZ2010	定子	36	400	2000	1.0	K3	50
30	28XZ305	定子	36	400	3000	0.56	K3	50
31	28XZ3010	定子	36	400	3000	1.0	K3	50
32	28XZ3020	定子	36	400	3000	2.0	K3	50
33	28XZ405	定子	36	400	4000	0.56	K3	50
34	28XZ406	定子	36	400	4000	0.65	K3	50
35	28XZ407	定子	36	400	4000	0.78	K3	50
36	28XZ605	定子	36	400	6000	0.56	K3	50
37	28XZ6010	定子	36	400	6000	1.0	K3	50
38	36XZ045	定子	36	400	400	0.56	K3	60
39	36XZ0410	定子	36	400	400	1.0	K3	60
40	36XZ061	定子	36	400	600	0.15	K3	60
41	36XZ064	定子	36	400	600	0.45	K3	60
42	36XZ065	定子	36	400	600	0.56	K3	60
43	36XZ067	定子	36	400	600	0.78	K3	60
44	36XZ0610	定子	36	400	600	1.0	K3	60
45	36XZ105	定子	60	400	1000	0.56	K3	60
46	36XZ107	定子	60	400	1000	0.78	K3	60
47	36XZ1010	定子	60	400	1000	1.0	K3	60

续表

序号	型 号	励磁方	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	电压比	外形结构 GB 7346	机身长度（mm）
48	36XZ204	定子	60	400	2000	0.45	K3	60
49	36XZ205	定子	60	400	2000	0.56	K3	60
50	36XZ207	定子	60	400	2000	0.78	K3	60
51	36XZ2010	定子	60	400	2000	1.0	K3	60
52	36XZ2020	定子	60	400	2000	2.0	K3	60
53	36XZ301	定子	60	400	3000	0.15	K3	60
54	36XZ304	定子	60	400	3000	0.45	K3	60
55	36XZ305	定子	60	400	3000	0.56	K3	60
56	36XZ3010	定子	60	400	3000	1.0	K3	60
57	36XZ405	定子	60	400	4000	0.56	K3	60
58	36XZ4010	定子	60	400	4000	1.0	K3	60
59	36XZ4020	定子	60	400	4000	2.0	K3	60
60	36XZ605	定子	60	400	6000	0.56	K3	60
61	36XZ6010	定子	60	400	6000	1.0	K3	60
62	45XZ045	定子	115	400	400	0.56	K3	70
63	45XZ0410	定子	115	400	400	1.0	K3	70
64	45XZ064	定子	115	400	600	0.45	K3	70
65	45XZ065	定子	115	400	600	0.56	K3	70
66	45XZ0610	定子	115	400	600	1.0	K3	70
67	45XZ105	定子	115	400	1000	0.15	K3	70
68	45XZ105	定子	115	400	1000	0.56	K3	70
69	45XZ1010	定子	115	400	1000	1.0	K3	70
70	45XZ205	定子	115	400	2000	0.56	K3	70
71	45XZ2010	定子	115	400	2000	1.0	K3	70
72	45XZ305	定子	115	400	3000	0.56	K3	70
73	45XZ3010	定子	115	400	3000	1.0	K3	70
74	45XZ405	定子	115	400	4000	0.56	K3	70
75	45XZ4010	定子	115	400	4000	1.0	K3	70
76	45XZ605	定子	115	400	6000	0.56	K3	70
77	45XZ6010	定子	115	400	6000	1.0	K3	70
78	45XZ1005	定子	115	400	10000	0.56	K3	70
79	55XZ025	定子	115	400	200	0.56	K4	85
80	55XZ0210	定子	115	400	200	1.0	K4	85
81	55XZ045	定子	115	400	400	0.56	K4	85
82	55XZ0410	定子	115	400	400	1.0	K4	85
83	55XZ0610	定子	115	400	600	1.0	K4	85
84	55XZ105	定子	115	400	1000	0.56	K4	85
85	55XZ1010	定子	115	400	1000	1.0	K4	85

表 5.15-30　　线性旋转变压器典型数据

序号	型 号	励磁方	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	电压比	外形结构 GB 7346	机身长度（mm）
1	20XX065	定子	26	400	400	0.583	K1	40
2	28XX045	定子	36	400	400	0.56	K3	50
3	28XX065	定子	36	400	600	0.56	K3	50
4	28XX085	定子	36	400	800	0.57	K3	50
5	28XX105	定子	36	400	1000	0.56	K3	50
6	28XX205	定子	36	400	2000	0.56	K3	50
7	28XX305	定子	36	400	3000	0.56	K3	50

续表

序号	型　号	励磁方	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	电压比	外形结构 GB 7346	机身长度（mm）
8	28XX405	定子	36	400	4000	0.56	K3	50
9	36XX045	定子	36	400	400	0.56	K3	60
10	36XX065	定子	60	400	600	0.56	K3	60
11	36XX105	定子	60	400	1000	0.56	K3	60
12	36XX205	定子	60	400	2000	0.56	K3	60
13	36XX305	定子	60	400	3000	0.56	K3	60
14	36XX405	定子	60	400	4000	0.56	K3	60
15	36XX605	定子	60	400	6000	0.56	K3	60
16	36XX1005	定子	60	400	10000	0.56	K3	60
17	45XX045	定子	115	400	400	0.56	K3	70
18	45XX065	定子	115	400	600	0.56	K3	70
19	45XX105	定子	115	400	1000	0.56	K3	70
20	45XX205	定子	115	400	2000	0.56	K3	70
21	45XX305	定子	115	400	3000	0.56	K3	70
22	45XX405	定子	115	400	3000	0.56	K3	70
23	45XX1005	定子	115	400	10000	0.56	K3	70
24	55XX045	定子	115	400	400	0.56	K4	85
25	55XX065	定子	115	400	600	0.56	K4	85
26	45XX105	定子	115	400	1000	0.56	K3	70
27	55XX105	定子	115	400	1000	0.56	K4	85

表 5.15-31　　比例式旋转变压器典型数据

序号	型　号	励磁方	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	电压比	外形结构 GB 7346	机身长度（mm）
1	28XL045	定子	36	400	400	0.56	K3	50
2	28XL0410	定子	36	400	400	1.0	K3	50
3	28XL061	定子	36	400	600	0.15	K3	50
4	28XL065	定子	36	400	600	0.56	K3	50
5	28XL0610	定子	36	400	600	1.0	K3	50
6	28XL1010	定子	36	400	1000	1.0	K3	50
7	28XL205	定子	36	400	2000	0.56	K3	50
8	28XL207	定子	36	400	2000	0.78	K3	50
9	36XL065	定子	36	400	600	0.56	K3	60
10	36XL105	定子	60	400	1000	0.56	K3	60
11	36XL1010	定子	60	400	1000	1.0	K3	60
12	36XL205	定子	60	400	2000	0.56	K3	60
13	36XL2010	定子	60	400	2000	1.0	K3	60
14	36XL305	定子	60	400	3000	0.56	K3	60
15	36XL3010	定子	60	400	3000	1.0	K3	60
16	36XL405	定子	60	400	4000	0.56	K3	60
17	36XL4010	定子	60	400	4000	1.0	K3	60
18	36XL6010	定子	60	400	6000	1.0	K3	60
19	45XL041	定子	115	400	400	0.15	K3	70
20	45XL045	定子	115	400	400	0.56	K3	70
21	45XL061	定子	115	400	600	0.15	K3	70
22	45XL065	定子	115	400	600	0.56	K3	70
23	45XL0610	定子	115	400	600	1.0	K3	70
24	45XL105	定子	115	400	1000	0.56	K3	70
25	45XL106	定子	115	400	1000	0.65	K3	70

续表

序号	型 号	励磁方	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	电压比	外形结构 GB 7346	机身长度（mm）
26	45XL1010	定子	115	400	1000	1.0	K3	70
27	45XL205	定子	115	400	2000	0.56	K3	70
28	45XL206	定子	115	400	2000	0.65	K3	70
29	45XL2010	定子	115	400	2000	1.0	K3	70
30	45XL305	定子	115	400	3000	0.56	K3	70
31	45XL3010	定子	115	400	3000	1.0	K3	70
32	45XL405	定子	115	400	4000	0.56	K3	70
33	45XL4010	定子	115	400	4000	1.0	K3	70

表 5.15-32 旋变发送机典型数据

序号	型 号	励磁方	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	电压比	外形结构 GB 7346	机身长度（mm）
1	20XF044	转子	26	400	400	0.45	K1	40
2	20XF064	转子	26	400	600	0.45	K1	40
3	28XF064	转子	36	400	600	0.45	K3	50
4	36XF044	转子	36	400	400	0.45	K3	60
5	45XF047	转子	115	400	400	0.78	K3	70

表 5.15-33 旋变差动发送机典型数据

序号	型 号	励磁方	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	电压比	外形结构 GB 7346	机身长度（mm）
1	20XC0410	定子	26	400	400	1.0	K1	40
2	28XC0610	定子	36	400	600	1.0	K3	50
3	36XC0410	定子	36	400	400	1.0	K3	60
4	45XC0610	定子	60	400	600	1.0	K3	70

表 5.15-34 旋变变压器典型数据

序号	型 号	励磁方	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	电压比	外形结构 GB 7346	机身长度（mm）
1	20XB1020	定子	12	400	1000	2.0	K1	40
2	36XB1010	定子	16	400	1000	2.0	K3	60
3	36XB2010	定子	16	400	2000	2.0	K3	60
4	36XB3010	定子	16	400	3000	2.0	K3	60
5	45XB206	定子	90	400	2000	0.65	K3	70
6	45XB406	定子	90	400	4000	0.65	K3	70
7	45XB1006	定子	90	400	10000	0.65	K3	70
8	20XB1020	定子	12	400	1000	2.0	K1	40
9	36XB1010	定子	16	400	1000	2.0	K3	60

表 5.15-35 无接触旋转变压器典型数据

序 号	型 号	类型	励磁电压（V）	频率（Hz）	电压比	开路输入阻抗（Ω）
1	20XFW4101	1R/2S	12	400	1.000	1000
2	20XFW4041	1R/2S	12	400	1.000	400
3	20XBW4101	2S/1R	12	400	1.000	1000
4	20XBW4105	2S/1R	12	400	0.500	1000
5	20XFW1105	1R/2S	12	1000	0.500	1000
6	20XFW1065	1R/2S	12	1000	0.500	600
7	20XBW1201	2S/1R	6	1000	1.000	2000
8	28XFW4054	1R/2S	26	400	0.454	500
9	28XFW4104	1R/2S	26	400	0.454	1000
10	28XFW4051	1R/2S	12	400	1.000	500
11	28XFW4101	1R/2S	12	400	1.000	1000

续表

序　号	型　号	类型	励磁电压（V）	频率（Hz）	电压比	开路输入阻抗（Ω）
12	28XFW4103	1R/2S	36	400	0.330	1000
13	28XFW4203	1R/2S	36	400	0.330	2000
14	28XBW4103	2S/1R	12	400	1.000	1000
15	28XBW4201	2S/1R	12	400	1.000	2000
16	28XBW4155	2S/1R	12	400	0.500	1500
17	28XBW4105	2S/1R	12	400	0.500	1000
18	28XFW2154	1R/2S	26	2000	0.454	1500
19	28XFW2051	1R/2S	12	2000	1.000	500
20	28XFW2151	1R/2S	12	2000	1.000	1500
21	28XFW2201	1R/2S	12	2000	1.000	2000
22	28XBW2155	2S/1R	12	2000	0.500	1500
23	28XBW2305	2S/1R	12	2000	0.500	3000
24	28XFW5201	1R/2S	6	5000	1.000	2000
25	28XFW5501	1R/2S	6	5000	1.000	5000
26	28XZW4053	2S/2R	26	400	0.330	500
27	28XZW4087	2S/2R	12	400	0.700	800
28	28XCW4051	2R/2S	12	400	1.000	500
29	36XFW4121	1R/2S	26	400	1.000	1200
30	36XFW4061	1R/2S	26	400	1.000	600
31	36XFW4124	1R/2S	26	400	0.454	1200
32	36XFW4201	1R/2S	12	400	1.000	2000
33	36XFW4103	1R/2S	36	400	0.330	1000
34	36XFW4203	1R/2S	36	400	0.330	2000
35	36XBW4201	2S/1R	26	400	1.000	2000
36	36XBW4121	2S/1R	12	400	1.000	1200
37	36XFW2154	1R/2S	12	2000	0.454	1500
38	36XFW2151	1R/2S	12	2000	1.000	1500
39	36XBW2205	2S/1R	12	2000	0.500	2000
40	36XBW2301	2S/1R	12	2000	1.000	3000
41	36XZW4063	2S/2R	26	400	0.330	600
42	36XZW4107	2S/2R	12	400	0.700	1000
43	36XCW4061	2R/2S	12	400	1.000	600
44	45XFW4107	1R/2S	36	400	0.700	1000
45	45XFW4103	1R/2S	36	400	0.330	1000
46	45XBW4301	2S/1R	26	400	1.000	3000
47	45XBW4201	2S/1R	12	400	1.000	2000
48	45XZW4205	2S/2R	36	400	0.500	2000
49	45XZW4207	2S/2R	36	400	0.700	2000
50	45XCW4201	2R/2S	26	400	1.000	2000
51	55XFW4157	1R/2S	36	400	0.700	1500
52	55XFW4153	1R/2S	36	400	0.330	1500
53	55XBW4301	2S/1R	26	400	1.000	3000
54	55XBW4251	2S/1R	12	400	1.000	2500
55	55XZW4255	2S/2R	36	400	0.500	2500
56	55XZW4257	2S/2R	36	400	0.700	2500
57	55XCW4251	2R/2S	26	400	1.000	2500

表 5.15-36 感应移相器典型数据

序号	型 号	频率(kHz)	励磁电压(V)	开路输入阻抗(kΩ)	输出电压(V)	短路输出阻抗(kΩ)	使用频率范围(kHz)	移相电容(pF)
1	20YG210	10	10	2000	4	6	10～20	2000
2	20YG220	20	10	2000	4	6	20～40	1000
3	20YG240	40	10	2000	4	6	40～75	550
4	20YG275	75	10	2000	4	6	75～150	270
5	28YG104	0.4	15	1000	6	30	0.4～1	10000
6	28YG11	1	15	1000	6	15	1～2	10000
7	28YG12	2	15	1000	6	10	2～4	10000
8	28YG14	4	15	1000	6	5	4～10	6200
9	28YG210	10	10	2000	4	6	10～20	2000
10	28YG220	20	10	2000	4	6	20～40	1000
11	28YG240	40	10	2000	4	6	40～75	510
12	28YG275	75	10	2000	4	6	75～150	270
13	36YG104	0.4	15	1000	6	15	0.4～1	20000
14	36YG504	0.4	15	500	6	15	0.4～1	20000
15	36YG11	1	15	1000	6	10	1～2	20000
16	36YG12	2	15	1000	6	10	2～4	10000
17	36YG14	4	15	1000	6	5	4～10	6200

4 高精度角位传感电机

伴随着武器装备精度要求的提高和新型武器装备的开发，要求角位传感电机精度达数分至数秒甚至几秒，而前面两节介绍的精度为分级的自整角机、旋转变压器等角位传感电机已不能满足要求，开始人们采用机械变速的双通道系统，但由于齿轮变速所带来的误差极难低于 2′～3′，使系统精度无法进一步提高，因此机械变速的应用受到限制。逐步出现了电气变速的双通道系统以及精度达秒级的高精度角位传感电机，发展较快并得到应用的有多极自整角机、多极旋转变压器、多极感应移相器、磁阻式多极旋转变压器、感应同步器、电容传感器、光栅角度传感器、轴角编码器等，本节介绍前五种作用原理相同的高精度角位传感电机。

4.1 传统角位传感电机分类

4.1.1 按输出信号的使用方式分类

- 幅值控制
 - 多极，双通道自整角机
 - 多极自整角发送机（ZFD）
 - 双通道自整角发送机（ZFS）
 - 多极自整角变压器（ZBD）
 - 双通道自整角变压器（ZBS）
 - 多极、双通道旋转变压器
 - 多极旋变发送机（XFD）
 - 双通道旋变发送机（XFS）
 - 多极旋变变压器（XBD）
 - 双通道旋变变压器（XBS）
 - 多极磁阻式旋转变压器（XUD）
 - 多极多相旋变发送机
- 相位控制
 - 多极感应移相器（YD）
 - 双通道感应移相器（YS）

4.1.2 按结构型式分类

- 多极
 - 分装式
 - 组装式
- 双通道
 - 共磁路
 - 分装式
 - 无接触式
 - 接触式
 - 组装式
 - 空心轴式
 - 无接触式
 - 接触式
 - 分磁路
 - 轴向组合式（并列式）
 - 径向组合式（重叠式）

4.2 传统角位传感电机结构

双通道电机分为分磁路式和共磁路式（见图 5.15-26）。分磁路式又称为机械组合式，指粗、精机各有自己独立的铁心，优点是排除了粗、精机磁路的相互干扰，利于电机精度的提高，且粗、精机零位偏差可调，设计参数容易调整；但结构复杂，零部件多，工艺性差，一般情况下避免使用。

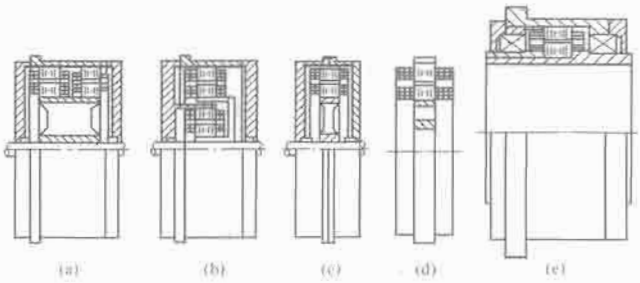


图 5.15-26 多极和双通道电机外形结构图
(a) 轴向组合式；(b) 径向组合式；(c) 组装式；
(d) 分装式；(e) 空心轴式

共磁路式是指粗、精机共用同一个铁心，磁路共用，这样粗、精机磁路存在的干扰，影响到电机的精度，且粗、精机零位偏差由设计确定后无法再调，设计参数的确定也受到局限；但这种电机结构紧凑简单，体积小，工艺性好。通过采取合理设计措施，可避免粗、精机磁路的相互干扰，精度可做到和分磁路相当的程度，是普遍采用的结构型式。

分装式和组装式结构的选择，应根据系统安装型式的需要而定。分装式是指定、转子分离组件提供使用，在系统整机轴上安装。电机安装的形位公差由电机和整机配合面加工精度及安装时精细的调整来保证，安装不当也会使电机的精度降低。

组装式结构和前几章叙述的组装式电机结构一样，定、转子通过机壳、端盖、轴承装配为一体，通过轴伸、联轴器和主轴连接。电机的精度由制造者来保证，使用比较方便。

还有一种空心轴式电机，集分装式电机和组装式电机的优点，既能直接与整机轴装配，又具有组装式电机使用方便的特点。

无接触双通道旋转变压器、自整角机精度和可靠性高，应用日趋广泛。其结构型式为图 5.15-27 所示的轴向组合式

和径向组合式。电机部分基本采用共磁路结构，径向组合式结构复杂，产品精度与有刷电机没有差异。轴向组合式结构简单，但无刷部分对电机部分容易产生电磁干扰，影响整机产品精度，因此无刷部分和电机部分空间距离应尽可能大，或者采取屏蔽措施。双余度无接触双通道电机采用图 5.15-28 所示的复合结构，无刷部分双余度采用轴向组合式，电机粗、精部分采用轴向组合式的分磁路结构，粗、精机的双余度采用共磁路结构，整机结构为径向组合式，其可靠性更高。

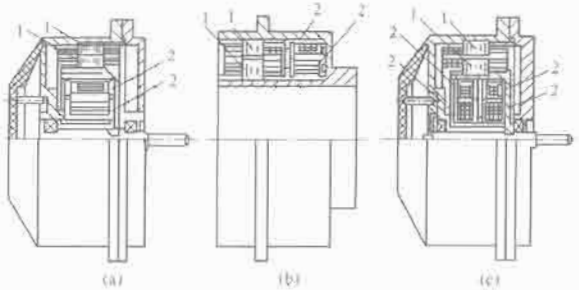


图 5.15-27　无接触双通道电机结构图

(a) 装配式旋变发送机；(b) 分装式旋变发送机；(c) 装配式旋变变压器

1—双通道旋转变压器；2—环形变压器

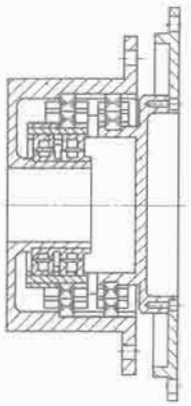


图 5.15-28　双余度无接触双通道电机结构

4.3　传统角位传感电机工作原理

传统角位传感电机与单对极电机工作原理大致相同，不同的只是当定子或转子绕组通电时，在空间产生 p 对极的多极气隙磁场，当转子转过 360°时，单对极电机输出电信号变化 360°，而多极输出电信号则变化 $360p$°电角度，相当于将两极时的角度放大了 p 倍，而实际的机械角仍为 360°，从而提高了分辨率。对粗、精组合的双通道角位传感电机，则能同时输出变化 1 个周期和 p 个周期的两种电信号。

4.3.1　多极和双通道自整角发送机

其电气原理图如图 5.15-29 所示，每相绕组输出相电压方程式如下

$$\left.\begin{aligned}
U_{S1} &= K_u U_R \cos(\theta+\theta_{op}) \\
U_{S2} &= K_u U_R \cos(\theta+\theta_{op}-120°) \\
U_{S3} &= K_u U_R \cos(\theta+\theta_{op}-240°) \\
U_{S4} &= K_{up} U_R \cos p\theta \\
U_{S5} &= K_{up} U_R \cos(p\theta-120°) \\
U_{S6} &= K_{up} U_R \cos(p\theta-240°)
\end{aligned}\right\} \quad (5.15\text{-}15)$$

式中，θ 为转子转角；θ_{op} 为粗精机零位偏差；K_u、K_{up} 为粗、精机电压比，以下类同。

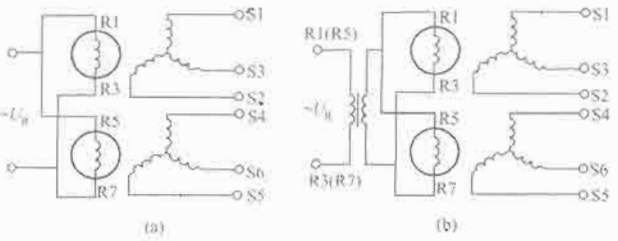


图 5.15-29　双通道自整角发送机电气原理图

(a) 双通道自整角机；(b) 无接触双通道自整角机

4.3.2　多极和双通道自整角变压器

电气原理图如图 5.15-30 所示，输出电压方程式及输入绕组的线电压之间关系式如下

$$\left.\begin{aligned}
U_{R1R2} &= K_u[U_{S1S3}\sin(\theta+\theta_{up}+120°)-U_{S3S2}\sin(\theta+\theta_{op})] \\
&\quad U_{S1S3}+U_{S3S2}+U_{S2S1}=0 \\
U_{R1R5} &= K_{up}[U_{S1S6}\sin(p\theta+120°)-U_{S6S5}\sin p\theta] \\
&\quad U_{S1S6}+U_{S6S5}+U_{S5S1}=0
\end{aligned}\right\} \quad (5.15\text{-}16)$$

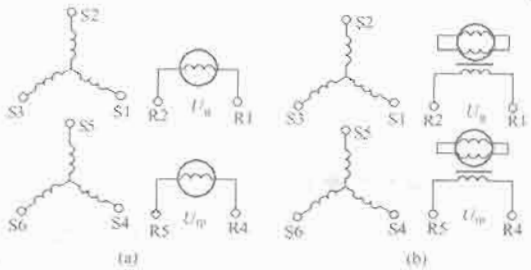


图 5.15-30　双通道自整角变压器电气原理图

(a) 双通道自整角变压器；(b) 无接触双通道自整角变压器

4.3.3　多极和双通道旋变发送机

电气原理图如图 5.15-31 所示，每相绕组输出电压方程式如下

$$\left.\begin{aligned}
U_{S1} &= K_u U_R \cos(\theta+\theta_{op}) \\
U_{S2} &= K_u U_R \sin(\theta+\theta_{op}) \\
U_{S1p} &= K_{up} U_R \cos p\theta \\
U_{S2p} &= K_{up} U_R \sin p\theta
\end{aligned}\right\} \quad (5.15\text{-}17)$$

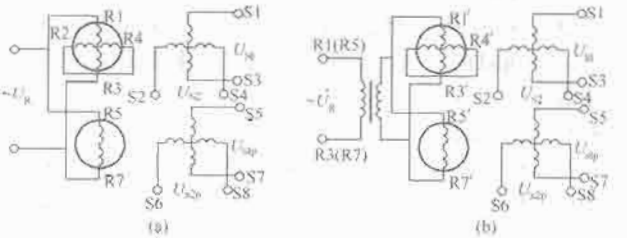


图 5.15-31　双通道旋变发送机电气原理图

(a) 双通道旋变发送机；(b) 无接触双通道旋变发送机

4.3.4　多极和双通道旋变变压器

其电气原理图如图 5.15-32 所示，输出电压方程式如下

$$\left.\begin{aligned}
U_{R1} &= K_u U_{S1}\cos(\theta+\theta_{op})-K_u U_{S2}\sin(\theta+\theta_{op}) \\
U_{R1p} &= K_{up} U_{S1p}\cos p\theta - K_{up} U_{S2p}\sin p\theta
\end{aligned}\right\} \quad (5.15\text{-}18)$$

4.3.5　多极多相旋变发送机

其电气原理图如图 5.15-33 所示，输出电压方程式

$$U_{si} = K_{up}U_R\cos[p\theta-(i-1)360°/m] \quad (5.15\text{-}19)$$

式中，m 为相数；$i=1, 2, \cdots, m$。

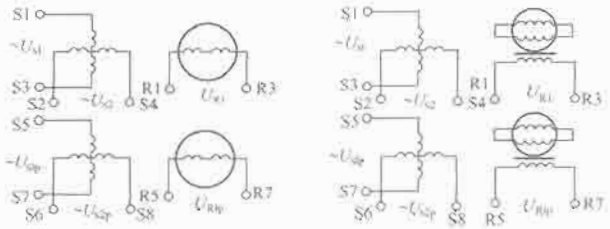


图 5.15-32 双通道旋变变压器电气原理图

(a) 双通道旋变变压器；(b) 无接触双通道旋变变压器

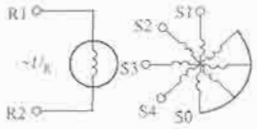


图 5.15-33 多极多相发送机电气原理图

4.3.6 双通道感应移相器

其电气原理图如图 5.15-34 所示，输出电压方程式

$$\begin{cases} U_2 = \dfrac{K_u U_1}{\sqrt{2}} e^{j(\theta+\theta_{up}-45°)} \\ U_{2p} = \dfrac{K_{up}U_1}{\sqrt{2}} e^{j(p\theta-45°)} \end{cases} \quad (5.15\text{-}20)$$

4.4 主要技术指标和参数

多极、双通道传感电机和单对极传感电机一样，包括性能指标和精度指标两方面的内容，也是以精度为核心来衡量其性能的优劣，这里主要介绍影响精度的主要指标。

4.4.1 极对数

多极自整角机、旋转变压器励磁绕组形成的气隙磁场极对数，决定着双通道系统电气变速的速比，随着极对数的增加，系统的精度可得到提高。采用的极对数有 2、4、5、8、11、15、16、20、25、30、32、36、60、64、72 和 128，目前 16、32 和 64 极对数居多。

4.4.2 开路输入阻抗

输出绕组开路时，励磁绕组端的阻抗。随着极对数的增加，电机直流电阻增大，开路输入阻抗中漏抗分量增大，主电抗分量减小，因此精机开路输入阻抗做不高，一般为 100～200Ω，粗机阻抗由粗、精机的气隙磁通密度比来决定，一般为数千欧。

4.4.3 电气误差

多极自整角机、旋转变压器的电气误差指其转子实际转过的机械角度与其对应的理论角度之差（单峰值、平均值、方均根值等），系统的精度主要取决于它。同样可分成两大类：

1) 设计局限性产生的固有误差：①由于绕组非正弦分布，励磁磁场里产生 $4k\pm1(6k\pm1)$ 次的高次谐波，在输出绕组感应出 $4k\pm1(6k\pm1)$ 次的高次谐波电动势，使所造成的误差作 $4k(6k)$ 周期的变化。②定、转子开槽产生的齿谐波磁导，励磁磁场里产生 $(Z_0\pm1)p$ 次或 $(2Z_0\pm1)p$ 次的高次齿谐波，产生谐波。

2) 工艺局限性产生的工艺误差：① 定、转子偏心。② 定、转子椭圆。③ 铁心冲片材料磁导率的各向不同性或片间短路。④ 齿槽歪斜。⑤各相绕组匝数不相等、不准确、匝间短路。⑥绕组端部不对称，各相绕组在槽内位置不均衡。其中

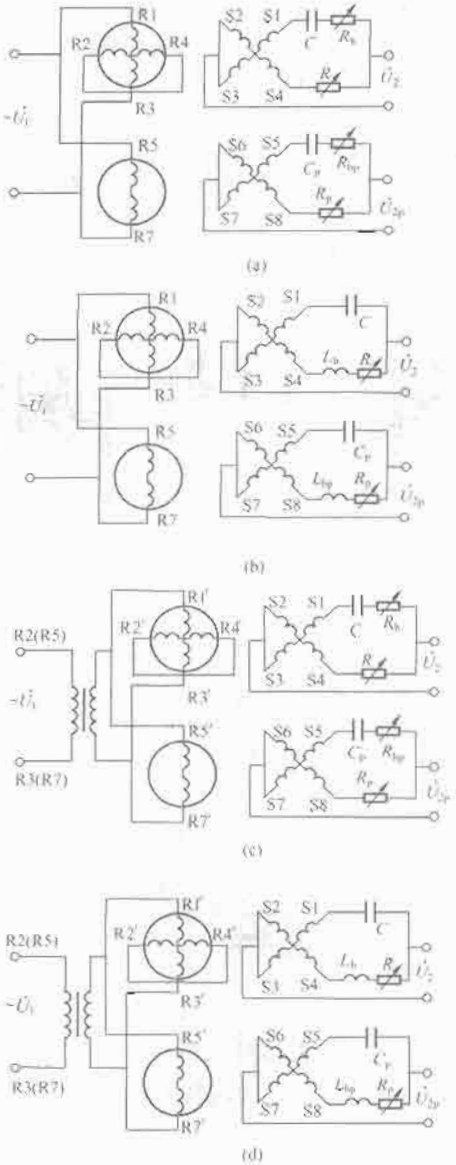


图 5.15-34 双通道移相器电气原理图

(a) 电阻补偿；(b) 无接触式电阻补偿；(c) 电感补偿；(d) 无接触式电感补偿

定、转子偏心和齿槽歪斜影响最大，而后三个因素使得绕组不对称，各相电气参数不对称，造成输出电压幅值不等及两相绕组不正交，产生误差。

电气误差的大小与电机的机座号和极对数有很大关系。国家标准及国家军用标准根据实际设计和工艺情况，给定了不同机座号和极对数的多极和双通道旋转变压器精度等级及其电气误差数值，见表 5.15-37，也可以根据整机系统的实际需要来确定。

4.4.4 零位电压

零位电压的定义和单对极传感电机相同，精机一般要求小于最大输出电压的 0.3%，粗机一般要求小于最大输出电压的 0.5%。

4.4.5 粗、精机零位偏差

粗机基准电气零位与精机基准电气零位之差，精机为 2^n 对极的双通道旋转变压器，存在原理性粗、精机零位偏差，而其他极对数的双通道旋转变压器受制造工艺因素影响，也存在粗、精机零位偏差。粗、精机零位偏差过大，影响系统零位调整，对提高精度不利。一般规定 32 对极及其以下的粗、精机零位偏差应不大于 $\pm30'$，64 对极及其以上

的粗、精机零位偏差应不大于±20′。

表 5.15-37　多极和双通道旋转变压器电气误差精度等级

粗、精机	机座号	极对数 p	电气误差精度等级		
			0 级	Ⅰ级	Ⅱ级
粗机	45～400	1	30′		
精机	45	≤8	45″	1′30″	3′
	70		30″	1′	2′
		≥15	30″	40″	1′20″
	90		15″	30″	60″
	110	≤20			
	130	≥30	10″	20″	40″
	160	≥64	7″	15″	30″
	200				
	250		8″	10″	20″
	320		5″	10″	20″
	400	128	2″	5″	10″

4.4.6　相位误差

相位误差是指输出电压的基波与励磁电压的基波之间的相位移与相应的转子实际转角之差，是多极和双通道感应移相器的主要精度指标。受测试设备及测试技术的限制，国内工程上用测量一对极相位误差和零相位误差来表示。

表 5.15-38 为国家标准及国家军用标准中规定的多极和双通道感应移相器不同机座号和极对数的电机的误差精度等级及其相位误差。

表 5.15-38　多极和双通道感应移相器相位误差精度等级

粗、精机	机座号	极对数 p	电气误差精度等级		
			0 级	Ⅰ级	Ⅱ级
粗机	45～320	1	30′		
精机	45	8	±1′30″	±3′	±4′30″
	70	16	±1′	±2′	±3′
	110	16	±45″	±1′30″	±2′15″
		20	±30″	±1′	±1′30″
		32			
		36			
	160	64	±15″	±30″	±45″
	250	64	±10″	±20″	±30″
	320	64、128			

4.5　设计要点

多极和双通道自整角机、旋转变压器设计的计算方法和单对极传感电机大致相似，但由于极对数增加，还出现了一些特点：

1）冲片设计。要实现多极，必须有更多的齿槽，在一定的尺寸下，齿槽越多，冲片各部分尺寸就越小。因此保证冲片的尺寸公差、形位公差和机械强度是设计多极传感电机的主要出发点。

2）转子齿数通常取为 $2p$ 或 $4p$，同机座号、同极对数的发送机和变压器定、转子冲片通用，对每极每相槽数为 1 的多极传感电机，计算方法按凸极方法计算。

3）多对极自整角机、旋转变压器的气隙与极距之比 δ/τ 比单对极电机高一个数量级，对提高精度有好处。

4）开路输入阻抗低，且调整范围远比单对极窄。电动势系数低，且随极对数的增加而急剧下降，漏阻抗电阻分量大，因而相位移大。

5）共磁路中，为了消除粗机磁场对精机的影响，粗、精机气隙磁通密度应拉开（一般 3 倍以上）。

6）在共磁路中，精机主要为齿部磁路在起作用，磁场饱和系数和单对极电机差不多（1.1 左右），而粗机轭部高度短且磁路很长，致使轭部磁通密度高，轭部磁路在起主导作用，磁场饱和系数较大，电流系数较大，计算励磁绕组匝数时应考虑电流系数，否则计算的匝数偏低。

7）多极自整角变压器、多极旋变变压器的电动势系数更低，而转子极弧系数较大，因此两轴电枢反应系数相差不大，可不进行交轴参数计算。

8）精机磁通密度较低，槽满率不高，磁路尺寸（齿高、齿宽、轭高）和材料的确定主要取决于工艺结构及加工中可能的变形和强度。

9）绕组型式的确定。共磁路中的粗机绕组采用短距绕组或正弦绕组，采用第Ⅰ型还是第Ⅱ型正弦绕组型式应根据粗、精机零位偏差来确定；精机转子采用单相集中绕组；精机定子绕组采用分数槽正弦绕组（自整角机采用分数槽不等匝同心式绕组）。当极对数 $p=2^n$ 时，采用第Ⅰ型或第Ⅱ型绕组；当极对数 $p=2^n$ 时，采用第Ⅲ型正弦绕组，而第Ⅲ型正弦绕组每单元绕组每槽匝数均不相同，要进行绕组分层方能实现。为保证精度，绕组匝数取整后，必须进行误差计算（正交误差，三次、五次函数误差、正交误差），将设计缺陷所产生的误差控制到最小。

10）无接触双通道自整角机、旋转变压器电磁方案的设计涉及环形变压器、旋转变压器粗机、旋转变压器精机三方六部分（定、转子各一）电参数的综合设计，阻抗参数互相影响制约，其阻抗参数匹配计算较为复杂。首先就要确定环形变压器、旋转变压器各自的开路输入阻抗，旋转变压器粗机和精机的开路输入阻抗，然后进行环形变压器和旋转变压器、旋转变压器粗机和精机的阻抗匹配计算，最大输出电压及相位移等参数的计算。对于无接触旋变发送机来说，无刷部分变压器放置在一次侧，其短路输出阻抗要设计得尽可能低，便于作为下一级的旋转变压器的开路输入阻抗匹配及输出电压的容易实现。

11）无接触双通道自整角机、旋转变压器电机粗机、精机部分一般为共磁路结构，电机粗、精机之间电磁干扰及环形变压器与电机粗、精机之间的电磁干扰是影响电气误差的主要原因之一，在设计上要尽量拉开粗机及精机的气隙磁通密度，并选择合适的环形变压器阻抗参数，通过合理的参数匹配，采取必要的屏蔽措施，消除电磁干扰。

4.6　试验、选用、故障及维护

4.6.1　试验

（1）相关技术标准

GJB 2143—1994《多极和双通道旋转变压器通用规范》

GJB 2144—1994《多极和双通道感应移相器通用规范》

GB/T 10403—2007《多极和双通道感应移相器通用技术条件》

GB/T 10404—2007《多极和双通道旋转变压器通用技术条件》

JB/T 3585.1—1996《感应同步器 术语》

JB/T 3585.2—1996《感应同步器 型式和基本尺寸》

JB/T 3586—1996《旋转感应同步器 基本参数和技术要求》

JB/T 3586—1996《标准型和窄型直线式感应同步器 基本参数和技术要求》

(2) 试验要求

多极和双通道自整角机、旋转变压器的试验与一对极自整角机、旋转变压器的相似，但装卡精机的角分度装置的分度误差和精机返零误差均应小于该电机最高精度的20%。函数电桥的电阻器及分压器的分压比精度不低于0.005%。感应分压器的比例误差不大于10^{-5}。

(3) 多极和双通道旋转变压器电气误差

电机安装在角分度装置上，确定粗机基准电气零位，在此附近确定精机基准电气零位。计算粗、精机零位偏差。电机先处于粗机基准电气零位，对粗机每隔15°测一点，共测24点。对精机从电机基准电气零位开始，转子正向旋转使相敏电压表指示的基波同相分量为零，依次读取所有点的零位误差，然后在最大正、负零位误差所处的极对下各测一对极（当出现多个相同正值或负值时，空间位置相差近180°的极对），每对极测24点（电气角度15°测一点）。测量中转子正向旋转使相敏电压表指示的基波同相分量为零，分别记下转子实际机械角度与其相应的理论电气位置所对应的机械角度，计算两者之差，超前为正偏差，滞后为负偏差，取其中绝对值最大的偏差作为电气误差。

对于极对数$p\geq64$的电机，在检查试验和验收试验时，可以进一步简化测量。其方法是从电机的基准电气零位开始，先测第一个单元绕组下所有零位误差，并取出正、负零位误差较大者各1～3点，然后测量其余各单元绕组下与第一个单元绕组下所取出较大正、负零位误差（1～3点）相对应的各点零位误差，最后在所得的零位误差中取最大正、负误差所处的极对下各测24点（电气角度15°测一点，当出现多个相同的正值或负值时，应取其空间相差近180°者，取其中绝对值最大的偏差为电气误差）。

(4) 多极和双通道感应移相器相位误差

电机安装在角分度装置上，选取规定的移相电容$C(C_p)$、移相电阻$R(R_p)$和补偿电阻$R_b(R_{pb})$，微调$R(R_p)$、$R_b(R_{pb})$，确定粗机相位零位，在此附近确定精机基准相位零位，计算粗、精机相位零位偏差。被试电机先处于粗机零相位位置，微调R、R_b，并微动电机转子，使示波器上获得第一个李沙育图形。记下此时角分度装置的角度，以此点作为粗机试验零位。电机转子从粗机的试验零位开始正转约15°，示波器上的李沙育图形便反转一次，感应移相器转子旋转1周，李沙育图形共翻转24次。计算上述各测点实测的机械角度与相应的理论相位角度之偏差，其中绝对值最大的偏差即为相位误差。

电机处于基准相位零位的位置，微调R_p、R_{bp}并微动电机转子，使示波器上获得李沙育图形。记下此时角分度装置的角度，以此点作为精机试验零位。电机转子从精机试验零位开始正转，每隔$90°/p$机械角度测一点，在示波器上出现李沙育图形时，读取电机转子实际的机械角度。依次测取，共测$4p$点。

电机极对数$p\geq64$时，电机转子从精机试验零位开始正转，每隔$360°/p$机械角度测一点，在示波器上出现李沙育图形时，读取电机转子实际的机械角度。依次测取，共测p点。

计算上述各特定点实测机械角度与相应的理论相位角度之偏差。超前为正、滞后为负。取最大正、负相位偏差点所在位置（当出现多个相同的最大正、负相位偏差点时，应取最大正、负相位偏差点近似相差180°机械角的两个位置）各测一对极的相位误差。测试方法同粗机，只不过每隔约$15°/p$机械角度测一点，共测24点。取其中绝对值最大的偏差即为精机相位误差。

4.6.2 选用

1) 多极自整角机、旋转变压器选型的原则与系统的工作方式密切相关。如幅值控制系统可选用多极和双通道旋转变压器和自整角机或多相电机，相位控制系统选用多极和双通道感应移相器。但多极和双通道感应移相器不具备单对极感应移相器以频率为特性的测距功能，不能用于测距系统。

2) 根据使用场合的不同，多极自整角机、旋转变压器有四种不同的工作方式可供选择：单相励磁，多相输出的发送机工作方式；多相绕组以时间相位相同，空间相位错开的多相对称电压励磁，单相输出的变压器工作方式；两相绕组以幅值相同、时间相位相差90°的两相电压励磁，单相输出的移相器工作方式；单相励磁，输出方接阻容移相器回路的移相器工作方式。

3) 极对数选择：①1∶20和1∶30的双通道电机用于替代机械式双速系统；②1∶11、1∶15、1∶25的奇数对极双通道电机用于同步随动系统，避免出现假零位；③1∶18、1∶36、1∶72的双通道电机用于十进制编码系统；④1∶16、1∶32、1∶64、1∶128双通道电机用于二进制编码系统；⑤当测量空间有限角度时，可选用极对数为5、6和20的多极电机。

4) 尽量选用国家标准和国家军用标准规定的型号，当不能满足系统要求时，可向研制单位提出特殊要求。

5) 可根据使用方的安装要求选用不同的安装型式，当要求与整机同轴安装时，可选用分装式或空心轴的安装型式，一般情况选择组装式。

6) 使用过程电源电压和频率误差不能超过±1%，电源波形失真度不大于1%，系统需要改变电压和频率时，一般允许在一定范围内升频使用，电气误差变化不大，而且还可以降低动态误差。但此时的技术参数发生了变化，零位电压和输出电压也有变化，对移相器来说，应重新调整移相参数。

7) 机械安装要准确、牢固，安装止口对轴线的跳动应控制在技术条件要求的范围内，对分装式结构要通过精确的调试，保证气隙的均匀性和铁心轴向错位很小。

8) 在同步随动系统中，极对数为偶数的双通道电机，在失调角为180°的机械角时，粗机的假零位与精机的真零位重合，会使系统错误定位或产生振荡。为消除假零位，必须在粗机的输出端加一恒定的交流偏压，其大小等于精机电气零位位置的粗机输出电压（设计时将粗机基准电气零位超前精机基准电气零位90°），相位相反。电机加偏压后，其粗、精机输出电压波形的相对位置如图5.15-35所示。

加偏压有两种情况：其一、设计时已将变压器的粗、精

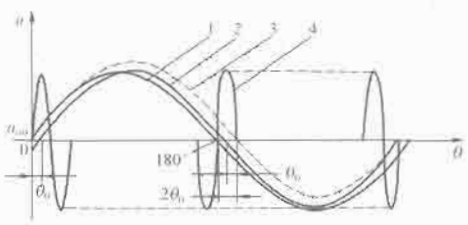


图5.15-35 加偏压后粗、精机输出电压波形的相对位置

1—粗机原来的电压波形；2—粗、精机电气零位错移后的电压波形；3—加偏压后的电压波形；4—精机电压波形

机基准电气零位错移精机电气角 90°者（通常为超前），可直接在粗机端加偏压。其二，对粗、精机零位重合的变压器，可将励磁方出线端的极性改变，然后再与发送机相连。

9）在双通道控制系统中，必须接入通道切换开关，以保证粗、精机协调而准确无误地工作。即当系统处于输出信号较大的大失调角区段，粗机工作，而精机被短接；随着信号减小，系统进入小失调角位置时，粗机随即断开，精机投入运行。双通道电机中，粗、精参数各异，相位移差异较大，要求用户在设计切换线路时考虑。

10）多极自整角机、旋转变压器由于原理因素决定其输入阻抗很难提高，因此，其随动系统不能像单对极传感电机一样，不能一台发送机带几台变压器，只能一台带一台。否则压降太大，影响系统正常工作，若需要，必须在每一精通道内接入 1∶1 放大器进行阻抗转换，保证良好的工作特性。

11）阻抗匹配对角位传感电机极为重要，选择负载阻抗必须与电机阻抗相匹配，两者之比最好大于 10∶1。同时注意电气变速和齿轮变速的区别，齿轮变速系统中，电机输出信号幅值大，输出阻抗小，一般在线路中要加限流电阻。而电气变速系统中所用多极电机输出信号小，输出阻抗却比较大，因此选择负载时必须考虑这些特点。

12）为了使系统中放大器不致饱和，配上良好的滤波装置克服电机零位电压是完全必要的。

13）多极传感电机在动态工作时，其动态误差往往比静态误差大，且随转速增加而增大，为了不影响使用，一般规定最高转速不应超过同步转速。

14）当使用条件恶劣，要求可靠性高、寿命长、抗干扰时，选用无接触式结构较适宜。

4.6.3　故障及维护

多极电机使用中常见故障及维修措施见表 5.15-39。

4.7　磁阻式多极旋转变压器

4.7.1　结构型式及特点

磁阻式多极旋转变压器是一种基于磁阻变化原理的高精度角位传感元件，可和无接触旋转变压器一起组成无接触双通道磁阻式旋转变压器，用于双通道电气变速系统中，也可单独使用。它与其他角位传感电机相比，具有高可靠性高、环境适应能力强、精度高、体积小、结构简单、性价比高等优点。

磁阻式旋转变压器实际上是磁阻可变的耦合变压器。其结构和一般磁阻式电动机结构型式相似，由定、转子组成，定子铁心和转子铁心分别都是由带有一定槽数的硅钢片叠成，定子铁心上带有大小齿，小齿分布在大齿的齿端部位，励磁绕组、输出绕组及补偿绕组均布置在定子铁心的大槽中，转子铁心上不带绕组，其齿数就是极对数。定、转子冲片如图 5.15-36 所示。

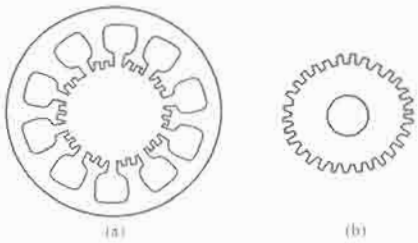


图 5.15-36　定、转子冲片图
（a）定子冲片；（b）转子冲片

4.7.2　工作原理

图 5.15-37 是磁阻式多极旋转变压器的工作原理图。定子槽内嵌有一套输入绕组（R_1-R_3）和两套输出绕组（S_2-S_4 和 S_1-S_3）。当输入绕组逐槽反向串接产生励磁磁通，输出绕组间隔绕制并反向串接，当转子位置角 θ 变化时，由于定、转子齿槽相对位置的变动，气隙磁导发生变化，导致输入、输出绕组之间互感的变化，输出电压幅值也随之变化，

表 5.15-39　　多极电机使用中常见故障及维护措施

故障现象	产生故障的原因	维护措施
电气误差超差	1. 机械安装不当，紧固不牢	1. 应重新调整系统安装止口对电机轴线的同轴度及安装端面的垂直度达到要求，各紧固螺钉应施力均匀
	2. 接线有误	2. 根据电气原理图接线端出线标记重新接线
	3. 电源电压、频率不稳定	3. 维修电源或更换电源提高电源质量，保证电源电压、频率波形失真度、稳定度等符合使用维护说明书要求
	4. 电刷和集电环接触不良	4. 送回生产厂家维修，调整电刷位置和压力，保证接触可靠性
	5. 负载阻抗不匹配	5. 提高负载阻抗
	6. 绕组短路	6. 换电机
相位误差超差	1.~6. 同上	1.~6. 同上
	7. 阻容参数不匹配	7. 调整补偿电阻和移相电阻
零位电压偏高	1. 励磁电压高	1. 调整励磁电压
	2. 励磁频率高	2. 调整励磁频率
	3. 绕组有短路	3. 换电机
励磁电流大	1. 励磁电压高	1. 检查电压达到要求
	2. 绕组有短路	2. 检查绕组直流电阻
输出电压为零或不稳定	1. 励磁绕组开路	1. 检查励磁绕组直流电阻
	2. 输出绕组开路或出线端短路	2. 检查输出绕组直流电阻
	3. 电刷和集电环接触不好	3. 调整电刷位置及压力
	4. 接线螺钉松动，有虚焊	4. 紧固螺钉，补焊
不移相	移相回路开路或参数不对	检查阻容回路是否接线正确，有无断开，参数是否符合要求

转子每转过一个齿距，气隙磁导及输出电压幅值都变化了一个周期。转子转过1周，输出电压幅值变化的周期数等于转子齿数 Z_r，因此转子齿数 Z_r 就相当于旋转变压器的极对数。输出电压表达式为

$$\left.\begin{aligned} U_{S1} &= K_u U_R \cos(Z_r\theta+\theta_0) \\ U_{S2} &= K_u U_R \sin(Z_r\theta+\theta_0) \end{aligned}\right\} \quad (5.15\text{-}21)$$

式中，K_u 为电压比；U_R 为励磁电压，V；θ_0 是一个根据绕组选型规定的角度。

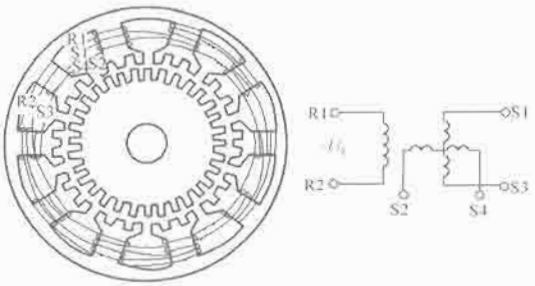


图 5.15-37 工作原理图

4.7.3 设计特点

磁阻式旋转变压器输出电压主要取决于气隙磁导的大小，而气隙磁导的大小又取决于旋转时定转子齿相对位置的变化，因此，输出电压与转子转角 θ 呈一定关系，为了使它严格地呈正、余弦函数关系，必须在气隙合成磁导中消除恒定分量和除基波之外所有高次谐波分量。

1）绕组型式。输入绕组采用等匝集中绕组，输出绕组采用正弦分布绕组，以消除感应电动势中恒定分量和削弱高次谐波分量。

2）转子齿数 Z_r。同多极旋转变压器一样，极对数越多，电机精度越高，而转子齿数 Z_r 就是电机的极对数，所以在尺寸允许的条件下，Z_r 尽量取大，为了适应数字化技术要求，取 $Z_r=2^i$，$i=1$，2，3，…。

3）定子单元齿数 Z_0 及重复部分数 n_0。当采用了正弦绕组后，磁场中仅存在次数为 $mZ_0\pm1$ 的齿谐波，Z_0 取得越大，齿谐波次数愈高。因此在可能的情况下，Z_0 应取得偏大，而由于多极元件具有磁场分割及电路串联等平均补偿作用，使得偏心、椭圆、磁路各向异性对电机的影响大大降低，从这点出发，希望 n_0 取得大。所以当定子大齿数 Z_d 已定时，Z_0 和 n_0 的选择应兼顾各自的利弊。在小尺寸时，n_0 取得偏小，大尺寸时，n_0 取得偏大。

4）定子小齿数 Z_x。为了进一步削弱气隙磁导中恒定分量 Λ_0 和高次谐波分量 $\Lambda_{m\nu}$，提高基波磁导分量 Λ_{m1}，必须合理地选择定子小齿数 Z_x。一般使 Z_x 接近但不等于 Z_r，这样既可保证磁导的基波分量，又可减小高次谐波分量。

5）定、转子齿形及气隙大小的选择。定、转子齿的形状及气隙大小，直接影响着气隙比各次谐波的幅值。故必须合理选择齿形气隙大小，以使比磁导高次谐波分量 $\lambda_{\delta\nu}$ 与基波分量 $\lambda_{\delta1}$ 之比尽量小。计算气隙中各次谐波磁导值，可以采用差分法或有限元法等数值计算方法，但在工程计算中，为了简单起见，往往将场的计算简化为路的计算，利用代角法进行计算。根据计算出来的数据，再合理地选择齿的形状，按理论设计应是辐射形，为了考虑加工方便，常把槽形设计成半梨形开口槽。

气隙比磁导的大小，和下列因素有关：定子小齿齿距与转子齿距之比，即定子小齿数与转子齿数之比，推荐选用7/8和15/16的齿数比，可以使在最小可能的外形尺寸获得最高的精度；定子小齿齿宽与定子齿距之比；定子小齿齿距与气隙之比；转子齿宽与转子齿距之比。在条件许可的情况下，气隙可选大些，以减少偏心、椭圆等的影响。

6）斜槽角的选择。为了削弱齿谐波磁场，和一般电机一样，斜槽是最有力的措施，斜槽角的大小取决于所要消除的某次谐波次数 ν，一般取 $\nu=Z_0$。

4.7.4 磁阻式多极旋转变压器的固有结构性误差补偿

由于输入、输出绕组都绕在同一铁心上。绕组间存在不通过气隙及转子的直接耦合，相当于增加了漏磁导，同时槽部较深，槽部漏磁导很大，当绕组在槽内位置不规则以及其他原因，使得恒定分量无法完全消除。同时两套绕组间杂散电容增加，进一步感应出干扰电压。这样一个恒定分量的存在，使得输出电压的正半波和负半波的幅值不等，如图5.15-38所示。恒定电压引起的电气误差呈基波形式。在实际电机中严重影响了零位误差和电气误差。为此通常在电机中放置两套对称的补偿绕组，它是等匝地分布在每个大齿上，感应出一个恒定的电动势，经过分压电阻分别与两个输出绕组串联，它们的相位正好和输出绕组中恒定分量的相位相反并通过分压电阻将幅值调至相等，补偿杂散干扰电压，误差补偿接线如图5.15-39所示。

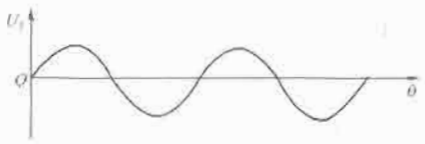


图 5.15-38 输出有恒定分量的波形

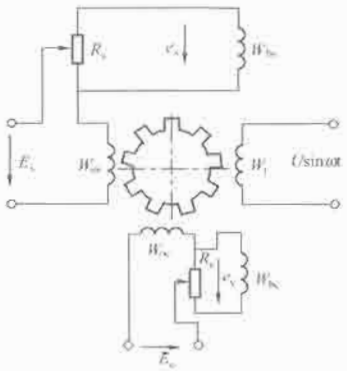


图 5.15-39 误差补偿接线图

W_{ac}、W_{bc}—补偿绕组；W_{as}、W_{cs}—输出绕组；W_f—输入绕组；R_s、R_c—分压电阻

4.8 感应同步器

感应同步器又称为感应整步机，是采用平面印制绕组工艺结构，利用类似于多极旋转变压器的电磁感应原理工作的，将位移量转变为电气信号的高精度位移检测元件。它主要应用于高精度数字位置伺服系统和位置数显系统和位置同步随动系统。感应同步器具有很高的精度和分辨率，抗干扰能力强，结构简单工作可靠，可以作长距离位移测量；缺点是输出信号弱，信号处理复杂。

4.8.1 分类

感应同步器按运动型式分类如下：



标准型是直线式中精度最高的一种，使用最广，在数控系统和数显装置中大量应用；窄型定尺的宽度比标准型的窄，用于精度较低或机床上安装位置窄小且安装面难于加工的情况；带型定尺绕组印制在不锈钢带上，其两端固定在机床床身上（一端用弹性固定），滑尺像计算尺的游框那样跨在带状定尺上，可以简化安装，减少安装面，而且能使定尺随机床床身热变形而变形；三重型的滑尺和定尺上均有粗、中、细三套绕组，滑尺上的粗、中、细三套绕组组成三个独立的电气通道，三通道同时使用即可组成一套绝对坐标测量系统。

4.8.2　结构

感应同步器在结构上分为固定和运动两大部分，对于直线式称为定尺（D）和滑尺（H），对于旋转式则称为定子（S）和转子（R）。无论直线式还是旋转式，定、动两部分都是片状，因此有时称为定片和动片。

直线式感应同步器的结构示意图如图 5.15-40 所示，由基板、绝缘层、绕组及屏蔽层组成，绕组由铜箔构成，厚度为 0.05mm 左右，基极和绕组之间是经过精加工的绝缘层。绕组还要加一层和绕组绝缘的屏蔽层，屏蔽层采用铝箔或铝膜。由于直线式感应同步器一般都是用在机床上，床体大都是用钢材做成，为了保证线膨胀系数一致，变形相同，因此直线式感应同步器的基板也用钢板或铸铁做成，以减少温度造成的误差。考虑到适应接长的要求及安装的方便，通常将定尺做成连续式的，如图 5.15-41 所示；而将滑尺做成分段式的，如图 5.15-41 所示。滑尺上是两相正交绕组，而定尺上是单相绕组。

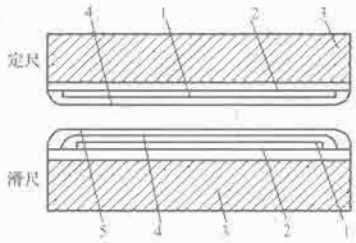


图 5.15-40　直线式感应同步器结构
1—绕组（铜箔）；2—绝缘层；3—基板；
4—耐切削油防腐层；5—屏蔽层（铝箔）

标准型和窄型直线式感应同步器的常规长度是 250mm。在大型机床数显使用时，坐标长度大于 170mm 时，需要用多片定尺接长。在工业现场接长调整存在一些安装和计量方面的实际不便。解决办法是采用组装尺，组装尺是将特殊设计的定尺和滑尺预先在生产厂组装成一个封闭的整体，按需要长度接长并调整好。已有坐标长为 1m 的组装尺。另一个解决办法是采用带型尺。它的定尺基体是一条不锈钢带，其上制作有连续绕组，长度最长为 10m。但精度比标准型稍差。

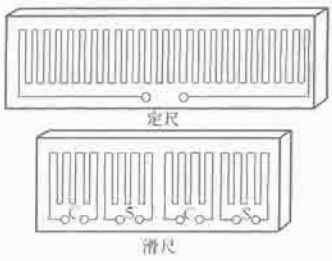


图 5.15-41　直线式感应同步器绕组

旋转式感应同步器的结构示意图如图 5.15-42 所示，也由基板、绝缘层、绕组及屏蔽层组成。定子、转子的基板一般都用玻璃、不锈钢、硬铝合金做成，呈环状，定子和转子相对的一面均有导电绕组，转子上是连续绕组。其径向导片数称为极数，有 360、720 和 1024 等几种。定子上是两相正交分段绕组，如图 5.15-43 所示。定、转子的有效导体呈辐射状。转子绕组的引线方式和自整角机、旋转变压器一样，有三种引线方式：直接由电缆引出、借助电刷和集电环引出、借助环形变压器引出。

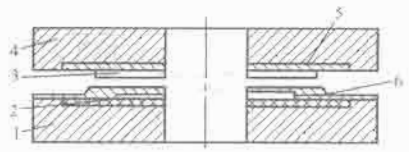


图 5.15-42　旋转式感应同步器结构
1—转子基板；2—转子绕组；3—定子绕组；
4—定子基板；5—绝缘层；6—屏蔽层（铝箔）

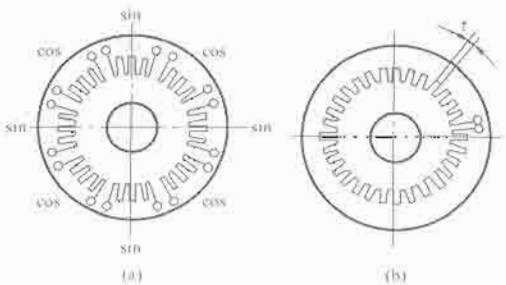


图 5.15-43　旋转式感应同步器绕组
（a）定子；（b）转子

4.8.3　工作原理

感应同步器的工作原理和前面介绍的多极旋转变压器相似。对旋转式感应同步器来说，当转子励磁绕组通电后，定子正、余弦绕组输出电动势为

$$\left.\begin{aligned} E_s &= E_m \sin p\theta \\ E_c &= E_m \cos p\theta \end{aligned}\right\} \tag{5.15-22}$$

式中，E_m 为输出电动势幅值；θ 为余弦绕组与励磁绕组轴线间的机械角度；p 为极对数，是转子导片数的一半。

直线式感应同步器可看作是将旋转式感应同步器的绕组沿直线展开在平面上。因此只要将式（5.15-22）中的 $p\theta$ 替换成 $\pi x/\tau$，即可得到直线式感应同步器的输出电动势表达式

$$\left.\begin{aligned} E_s &= E_m \sin(\pi x/\tau) \\ E_c &= E_m \cos(\pi x/\tau) \end{aligned}\right\} \tag{5.15-23}$$

式中，x 为直线式感应同步器滑尺的位移；τ 为极距，指两个相邻导体间的距离。

4.8.4 感应同步器工作方式和 I/D 转换

按照感应同步器使用时励磁方式和输出信号处理方法不同，可分为下列几种工作方式：

- 鉴幅工作方式
 - 变压器工作状态
 - 发送机工作状态
- 鉴相工作方式
 - 两相移相器工作状态
 - 单相励磁倍角幅/相转换移相器工作状态

（1）变压器工作方式

鉴幅工作方式是指根据感应同步器输出感应电动势的幅值随位移变化来鉴别机械位移量的工作方式。变压器工作状态是滑尺（定子）两相励磁、定尺（转子）单相输出的工作状态，与旋转变压器在轴角数据传输中的变压器工作状态相仿。

我国大多数感应同步器数显表是以此原理工作的。鉴幅型数显表简化框图如图 5.15-44 所示。

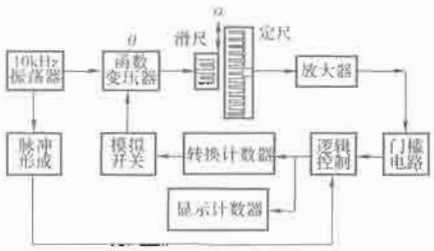


图 5.15-44 鉴幅型数显表简化框图

在这种数显表中，滑尺绕组的励磁电压是由函数发生器产生的。函数发生器内有特殊设计的多抽头变压器组，用模拟开关接通被选择的抽头。这些模拟开关接受转换计数器计数状态的控制，计数状态表示了数字化的指令电气角 θ。

另一种称为脉冲调宽型数显表，其工作原理与上述相似。不同点在于向滑尺供给的不是交流正弦电压，而是方波脉冲串。

方波脉冲宽度可表示为

$$u_s=\begin{cases}0 & (-\pi\leqslant\omega t<-\theta)\\ U & (-\theta\leqslant\omega t\leqslant\theta)\\ 0 & (\theta<\omega t<\pi)\end{cases}$$

$$u_c=\begin{cases}0 & [-\pi\leqslant\omega t<-(\pi/2-\theta)]\\ U & [-(\pi/2-\theta)\leqslant\omega t\leqslant(\pi/2-\theta)]\\ 0 & [(\pi/2-\theta)<\omega t<\pi]\end{cases}$$

方波脉冲宽度与指令角 θ 有关。两组方波由傅氏级数分析，其基波幅值分别与 $\sin\theta$ 和 $\cos\theta$ 成正比。所以在定尺（或转子）绕组感应的电动势的基波幅值也正比于 $\sin(\alpha-\theta)$。在电路上采用滤波器滤去高次谐波，即可得到常规交流正弦波电压励磁相同效果。这个由美国专利提出的方法，已在数显装置中应用。其最大优点是用数字电路取代了上述的特殊的函数变压器和电子模拟开关，容易实现集成化。

（2）发送机工作状态

这种工作方式中，感应同步器是定尺励磁，滑尺两相输出，与旋转变压器的发送机工作状态相似。实现感应同步器/数字转换的框图如图 5.15-45 所示。

图中 cos 乘法器和 sin 乘法器由可逆计数器的状态（数字电气角 θ）决定，它对输出的信号 u_s 和 u_c 分别乘以 $\sin\theta$ 和 $\cos\theta$。输出在加法放大器相加，即得到一个交流误差信号

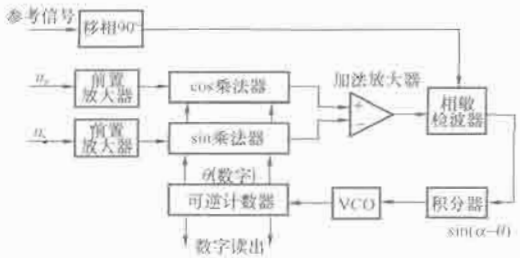


图 5.15-45 用函数乘法器的 I/D 转换框图

$$e_r=U_2\sin\omega t\sin(\alpha-\theta) \qquad (5.15\text{-}24)$$

此误差信号经相敏检波器解调为正比于 $\sin(\alpha-\theta)$ 的直流误差信号，经积分器驱动压控振荡器 VCO，由 VCO 输出脉冲信号使可逆计数器进行加减计数，以改变 θ 值使之趋向于 α。最后 $\theta=\alpha$，由计数器可以得到位移的测量值。基于此原理的 I/D 转换器已有集成电路模块或单片产品。

（3）两相励磁移相工作方式

鉴相工作方式是根据感应同步器输出电信号的相位差来鉴别位移量的工作方式。在滑尺两相绕组上供给两相正交交流电压，定尺感应电动势的相位角就是定、滑尺的相对位移。我国许多鉴相型数显表依此原理工作。其框图如图 5.15-46 所示。

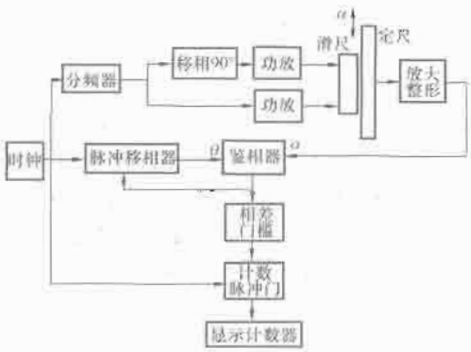


图 5.15-46 鉴相型数显表框图

（4）倍角幅/相转换工作方式

这种工作方式中，感应同步器是处于发送机工作状态，但信号处理不同于鉴幅型工作方式。滑尺两相输出 u_s 和 u_c 输入到倍角幅/相转换器中，如图 5.15-47 所示。

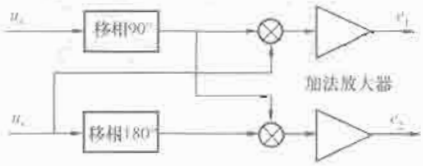


图 5.15-47 倍角幅/相转换框图

图中 u_s 信号经移相 90°处理，u_c 信号经移相 180°处理。电压 e_1 和 e_2 相位差为机械位移电气角 α 的两倍。将此相位差测出并数字化以后，即可直接读出位移量。由于是倍角的，提高了系统的分辨率。

需要注意的是，上述 4 种工作方式中，两相输入的鉴相工作方式对信号源稳定性要求比较严格。例如当两相幅度差 1%，90°相移差 0.5°时，可引起约 0.1%周期的误差。而鉴幅型工作方式中，精度决定于两相电压比的精度，故对信号源的幅值、频率和相移要求不高。但对于变压器工作方式，两相绕组回路阻抗要求准确平衡。鉴幅工作时，只有低速时才能得到高的精度，但其成本较低。

4.8.5　主要技术指标和参数

（1）励磁电压、励磁电流和频率

感应同步器的励磁电压受绕组电流密度的限制，一般都很低，大约为零点几伏至几伏。励磁电流一般为 0.1～0.5A，电源频率一般为 2～10kHz，但在实际使用时的工作频率可在较宽的范围内选择（2～50kHz 是常见的）。这主要取决于 I/D 转换器工作频率的选择，如时钟频率、最小分辨率等。另外一个考虑因素是系统运动的速度上限。若速度较高，则应采用较高的工作频率。但工作频率过高，电容效应增大，可能使精度变差。

（2）阻抗

感应同步器磁路基板的磁导率很低，和空气一样，即使在直线式感应同步器中采用铁基板，由于气隙很大，整个磁路的磁导也很小，因此在通常的 2～10kHz 的频率范围内，绕组的感抗远小于电阻，大约感抗只有电阻的 2%。这样励磁电压绝大部分都落在电阻上，感应电动势仅是很小的一部分。因此一次励磁电流和二次励磁电流近乎同相，而二次输出电动势和一次励磁电压的相位移几乎相差 90°。感应同步器的阻抗主要是电阻，因此阻抗值较小，一般是几欧到几十欧，实际上感应同步器的运行相当于开路状态。故只测量开路输入阻抗和开路输出阻抗。

（3）电压传递比（V. T. R）

感应同步器在规定气隙、规定工作频率下，输入励磁电压的基波分量与最大空载输出电压基波分量的比值称为电压传递比。测试时，规定以滑尺（或转子）励磁为准。由于导片数少，相当于每极仅半匝线圈，电磁耦合很弱，通常输出电动势仅为毫伏级，实际使用时都必须在输出处附近接有前置放大器。故此，总希望感应同步器有尽可能大的输出电动势，但一次侧励磁电压因考虑发热，不能增加过大，故希望电压传递比值尽可能小一些。在实际使用时，如果允许，可将气隙适当调得小一些，以获得较大的输出信号，提高系统的信噪比。

（4）周期、极距与极数

直线式感应同步器定尺绕组相邻导片间距为 1 个极距，1 个极距为半个电气周期（T）。旋转式感应同步器转子绕组相邻导片间的夹角也叫极距，每两个极距为 1 个周期（即一对极），转子绕组导片数等于其极数。感应同步器的周期是最重要的参数。当配用感应同步器/数字（I/D）转换器或数显表时，一定要注意其匹配。因为任何 I/D 转换都要在感应同步器 1 个周期内进行细分，细分数、脉冲当量、最低位数都与周期直接有关。

按我国标准，直线式感应同步器周期采用公制，只有 1 个规格：2mm。国外，如美国法兰德公司的规格中，还有采用 0.1in 和 0.2in 的英制感应同步器，选用时要注意。

旋转式感应同步器的极数选择由 A/D 转换器采用的数制及其分辨率要求而决定。我国标准极数是：① 二进制有 256、512、1024；② 六十进制有 360、720；③ 十进制有 2000。

（5）正确度（精度）

正确度（习惯上称为精度）表示感应同步器用作位移测量时，相对于起始零位的实际位移量与理论位移量之差，是表示系统误差大小的程度。仿照多极旋转变压器的分析，此系统误差可分解为零位误差和细分误差（又称电气误差）。对于周期为 2mm 的直线式感应同步器，在滑尺一相励磁时，定尺输出电动势随定、滑尺相对位移作正弦规律变化，每经过半个周期，会出现 1 次零电动势，故每经过 1mm 应出现 1 次零位。零位误差是指相对于选定的一个起始零位，每个零位所指示的实际位移量与理论位移量之差。感应同步器每个周期内的测量是用电气细分方法来实现的。这些细分点的误差用细分误差来表示。它是指 1 个周期内，每个细分点的实际位移量与理论位移量之差。

按照误差产生的原因来说，可分为三大类：原理性误差、工艺性误差和条件性误差。原理性误差是由于设计的不完善而固有的，如谐波磁场和谐波磁动势的存在而产生的误差，在提高设计水平之后，这类误差可大大减少。工艺性误差是由于工艺不完善、产生的几何尺寸精度不够导致的误差，如刻线不准、表面不平、不均匀等，这类误差是造成感应同步器误差的主要原因。条件性误差是由于测试或运行时外界条件不当而引起的，如安装造成的不同心、不平行等以及干扰所引起的误差。

旋转式感应同步器是成套使用的，通常给出它的零位误差和细分误差，或以两者的综合误差表示。而直线式感应同步器不一定成套使用，如接长使用时，一块滑尺与多块定尺配用。并且，由于零位误差主要决定于定尺的导片制作质量，细分误差主要决定于滑尺的导片制作质量，所以我国标准规定，定尺的正确度用零位误差表示，滑尺的正确度用细分误差表示。直线式感应同步器按正确度分为 0 级和Ⅰ级。如 250mm 标准型直线式感应同步器的定尺正确度 0 级为 ±1.5μm，Ⅰ级为 ±2.5μm；滑尺正确度 0 级为 ±0.8μm，Ⅰ级为 ±1.5μm。

4.8.6　安装和调整

为发挥感应同步器内在精度，感应同步器在测试和运行前，必须进行妥善的机械安装和调整，保证安装质量。

（1）旋转式感应同步器的安装和调整

旋转式感应同步器安装时应注意以下几点：① 定、转子绕组的同轴度和倾斜小于允许偏差；②不允许因安装而引起变形；③定、转子之间的气隙在合理的和设计值一致的数值内。安装的不同心和倾斜，会导致每转一次周期的零位误差；变形会引起高次的零位误差；偏离设计值的气隙会使输出电压发生变化，以致绕组端部电动势的影响变大，引起电气误差的增加。

（2）直线式感应同步器的安装和调整

直线式感应同步器的安装首先要保证定、滑尺之间基本尺寸的准确。在保证基本尺寸的前提下，方可进行定、滑尺的精细调整。定尺的调整包括定尺绕组端部对导轨的平行度、定尺绕组本身的平行度及安装平面的平直和清洁。包括绕组平面和绕组端面对导轨母线的平行度的调整；滑尺的调整内容仅包括滑尺的倾斜和四角气隙的不均匀性。通常滑尺的倾斜不大于 0.5″，四角的气隙不均匀度不大于 0.05mm。

直线式感应同步器在机床导轨上安装主要要求是：

1）定尺侧母线与机床导轨基准面 A 的不平行度允差为 0.1mm/全长；定尺安装平面与机床导轨基准面 B 的不平行度允差为 0.04mm/全长。

2）滑尺侧母线与机床导轨基准面 A 的不平行度允差为 0.02mm/全长；滑尺安装平面 B 与机床导轨基准面 B 的不平行度允差为 0.01mm/全长。

3）定尺基准侧面与滑尺基准侧面相距为（88.26±0.13）mm（标准型）和（47.78±0.13）mm（窄型）。

4）定、滑尺之间间隙为（0.25±0.05）mm。

5）定、滑尺四角间隙差不大于 0.05mm。

（3）感应同步器选用注意事项

1）分装式感应同步器必须装有防护罩，防止铁屑等异物或冷却液等溅入。

2）感应同步器输出电动势很小，要特别注意防止外界

干扰信号的串入。连接到感应同步器的阻抗变换器以及前置放大器都要尽可能地靠近，连线长一般应不超过500mm。到数显表的连线长一般应不超过15m。这些连线均需使用屏蔽线，并正确接地。感应同步器的输出输入线、接长时定尺间的连线不便采用屏蔽线时，应将连线扭绞。

3）在采用滑尺（或定子）两相输入的鉴幅工作方式时，两相绕组回路电阻（包括引线电阻）必须调整到完全平衡。分析表明，两相阻抗相对误差为0.2%时可以引起直线式感应同步器产生0.3μm的误差。

4）选用数显表的精度、分辨率要与感应同步器的周期、精度相匹配，并注意工作速度在数显表的最高允许跟踪速度之内，在多尺连接长时，还要注意与前置放大器输入阻抗的匹配问题。

4.9 典型产品技术数据

典型产品技术数据见表5.15-40和表5.15-41。

表5.15-40 多极和双通道旋转变压器典型数据

序号	型号	极对数	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	最大输出电压（V）
1	45XFD0442	4	26	400	400	5
2	45XFD0843	8	36	400	400	12
3	45XFD0822	8	26	2000	800	12
4	50XFS162	1/16	6	2000	600/80	3/3
5	60XFS1622	1/16	26	2000	1000/200	11.8/11.8
6	70XFD0824	8	26	400	400	12
7	70XFS0842	1/8	26	400	5700/400	12/12
8	70XFS1543	1/15	36	400	4500/200	12/12
9	70XBS1541	1/15	12	400	12000/400	6/6
10	70XFD1643	16	36	400	200	12
11	70XFD1642	16	26	400	200	5
12	70XFD1612	16	26	1000	200	12
13	70XFS1643	1/16	36	400	3000/200	12/12
14	70XFS1642	1/16	26	400	2700/200	5/5
15	70XFS1612	1/16	26	1000	1700/200	12/12
16	70XBS1641	1/16	12	400	3300/200	6/6
17	70XFS2043	1/20	36	400	3200/120	12/12
18	70XBS2041	1/20	12	400	6000/200	6/6
19	72XFS3242	1/32	26	400	4000/150	11.8/11.8
20	78XFS3222	1/32	26	2000	1500/150	11.8/11.8
21	90XFS1542	1/15	26	400	10000/150	12/12
22	90XFS3622	1/36	26	2000	1500/200	11.8/11.8
23	90XBS1541	1/15	12	400	20000/400	6/6
24	110XFS1543	1/15	36	400	2500/150	12/12
25	110XBS1541	1/15	12	400	3500/200	6/6
26	110XFD2043	20	36	400	200	12
27	110XFS2043	1/20	36	400	2000/200	12/12
28	110XBD2041	20	12	400	400	6
29	110XBS2041	1/20	12	400	2000/200	6/6
30	110XFS3043	1/30	36	400	3000/200	12/12
31	110XFS3042	1/30	26	400	2000/150	12/12
32	110XBS3041	1/30	12	400	2000/200	6/6
33	110XFD3242	32	26	400	150	12
34	110XFS3243	1/32	36	400	2500/150	12/12
35	110XBS3241	1/32	12	400	7900/400	6/6
36	110XFS3643	1/36	36	400	2500/200	12/12
37	110XFS3612	1/36	26	1000	2000/200	12/12

续表

序号	型　号	极对数	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	最大输出电压（V）
38	110XBS3641	1/36	12	400	12000/200	6/6
39	110XFD6412	64	26	1000	150	5
40	110XFS6422	1/64	26	2000	1800/140	11.8/11.8
41	130XBS2041	1/20	12	400	4500/600	6/6
42	130XFS6412	1/64	26	1000	1800/140	11.8/11.8
43	160XFS3242	1/32	26	400	4000/200	11.8/11.8
44	160XFD6443	64	36	400	100	12
45	160XFS6443	1/64	36	400	1300/90	10.5/12.5
46	160XFS6442	1/64	26	400	2000/150	5/5
47	160XFS6412	1/64	26	1000	1500/200	11.8/11.8
48	160XBS6421	1/64	12	2000	2000/200	6/6
49	200XFS3242	1/32	26	400	2000/150	11.8/11.8
50	200XFS6443	1/64	36	400	3500/200	12/12
51	200XFS6411	1/64	15	1000	—	15/5
52	200XFS6412	1/64	26	1000	2500/140	11.8/11.8
53	250XFS6442	1/64	26	400	1100/100	5/5
54	250XFS2842	1/128	26	400	1200/100	5/5
55	250XBS2842	1/128	26	400	1800/100	5/5
56	320XFS3241	1/32	15	400	2400/100	5/5
57	320XFS6412	1/64	26	1000	4200/100	11.8/11.8
58	320XFS6411	1/64	15	1000	4200/100	5/5
59	320XFS6421	1/64	15	400/2000	1000/100	5/5
60	320XFS2842	1/128	26	400	2400/100	4/4
61	320XFS2812	1/128	26	1000	4200/100	5/5
62	320XFS2822	1/128	26	2000	6300/100	5/5

表 5.15-41　　多极和双通道感应移相器典型数据

序号	型　号	极对数	励磁电压（V）	频率（Hz）	开路输入阻抗（Ω）	输出电压（V）	短路输出阻抗（kΩ）	移相电容（μF）
1	45YD081	8	15	1000	200	5	10	0.012
2	45YD082	8	15	2000	600	5	10	0.006
3	45YS082	1/8	15	2000	800	5	10	0.006
4	70YD1604	16	15	400	200	5	10	0.03
5	70YS161	1/16	15	1000	1000/200	5	10	0.012
6	70YS162	1/16	15	2000	400	5	10	0.006
7	110YD1604	16	15	400	5700/400	5	10	0.03
8	110YD2004	20	15	400	4500/200	5	10	0.03
9	110YS2004	1/20	15	400	12000/400	5	10	0.03
10	110YD3204	32	15	400	200	5	10	0.03
11	110YS321	1/32	15	1000	200	5	10	0.012
12	110YS322	1/32	15	2000	200	5	10	0.006
13	110YS361	1/36	15	1000	200	5	10	0.012
14	110YD362	1/36	15	2000	200	5	10	0.006
15	110YS6404	1/64	15	400	200	5	10	0.03
16	160YS641	1/64	15	1000	200	5	10	0.012
17	160YS642	1/64	15	2000	200	5	10	0.006
18	250YS6404	1/64	15	400	200	5	10	0.03

续表

序号	型 号	极对数	励磁电压 (V)	频率 (Hz)	开路输入阻抗 (Ω)	输出电压 (V)	短路输出阻抗 (kΩ)	移相电容 (μF)
19	250YS641	1/64	15	1000	200	5	10	0.012
20	320YS641	1/64	15	1000	200	5	10	0.012
21	320YS642	1/64	15	2000	200	5	10	0.006
22	320YS281	1/128	15	1000	200	5	10	0.012
23	320YS282	1/128	15	2000	200	5	10	0.006

5 其他角位传感器

5.1 D/A（数/模）转换器与A/D（模/数）转换器

5.1.1 概述

前面介绍的自整角机、旋转变压器和感应同步器等角位传感电机常使用于如火炮瞄准和控制、雷达天线跟踪等军用位置伺服系统，包括轴角信息的检测、传输、接收和变换。它们本来是模拟型机电元件，为适应测量系统和伺服系统数字化、普遍使用微处理器的要求，需要有一定的接口电路，以实现电机与数字系统之间的模拟量与数字量的相互转换。把模拟量（如电压）转换成等效的数字量的过程称为A/D（模/数）转换，其逆转换则称为D/A（数/模）转换。

美国AD公司和DDC等已有系列化的RDC、SDC、IDC和DRC、DSC转换器供应市场，可方便地应用于各种轴角位置检测、显示和闭环伺服控制中。国内在20世纪80年代初也开展了这方面的开发工作，并首先在舰载火力与指挥控制系统中获得应用。中国船舶工业总公司716研究所已有系列产品供应，其原理、性能与美国AD公司产品相近，可以满足工业控制、数控机床、工业机器人、武器控制系统和机电一体化领域的应用。

5.1.2 固态自整角机变压器和固态自整角机差动发送机

如图5.15-48所示，机电型控制式自整角变压器（用CT表示）的定子三端S1、S2、S3接收从控制式发送机（CX）送来的一组电压信号，这组信号表示了需要传输的发送机轴角θ的信息。当CT的转角为ϕ时，从其转子绕组两端R1-R2输出一个也是由参考频率f_r（$\omega=2\pi f_r$）调制的信号，其幅值正比于$\sin(\theta-\phi)$。

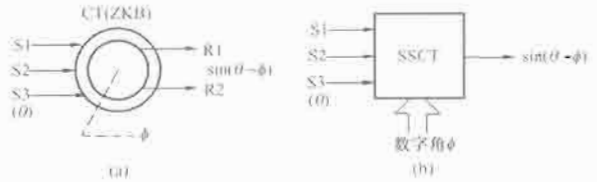


图5.15-48 控制式自整角变压器
（a）机电型CT；（b）固态型SSCT

固态控制式变压器（用SSCT表示）与机电型控制式自整角变压器CT有相同的功能。它同样接收S1、S2、S3三线自整角式模拟信号（代表输入的模拟量轴角θ），但是用一个数字化的代码，通常是自然二进制数码来表示另一个输入轴角ϕ。SSCT的输出仍然是一个由参考频率f_r调制的信号，其幅值正比于$\sin(\theta-\phi)$。

固态控制式变压器原理框图如图5.15-49所示。三线自整角机式信号从S1、S2、S3输入，经Scott-T型变压器进行隔离并变换成四线旋转变压器式信号。它们进入“象限转换开关”电路，由输入的数字角ϕ的前两个最高有效位（MSB）作用，按输入轴角θ所在的象限来确定后面两个函数发生器输出信号的极性。正弦和余弦函数发生器实现函数乘法的运算功能，在减法放大器中得到$\sin(\theta-\phi)$。

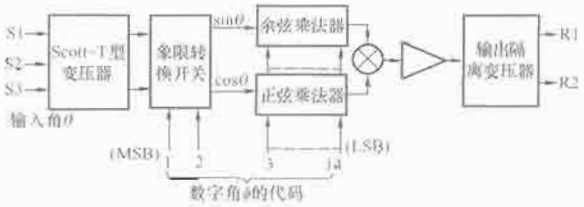


图5.15-49 固态控制式变压器原理框图

Scott-T型变压器是一个精密的静止变压器，其功能是实现三线自整角信号和四线旋转变压器信号之间的变换。由于采用了Scott-T型变压器技术，使得固态自整角机和固态旋转变压器、S/D和R/D转换器、D/S和D/R转换器主要环节是完全相同的。SSCT是固态控制式自整角机的主要组成部分，也是S/D和R/D转换器、D/S和D/R转换器的基本部分。

固态控制式自整角差动发送机SSCDX与机电型控制式自整角差动发送机CDX是相同的，实现轴角信息的传输和$(\theta-\phi)$的运算。不同点是：在SSCDX中是数字输入角，而且输出的角度信息是用四线旋变式信号，如图5.15-50所示。

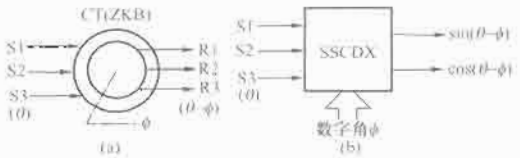


图5.15-50 控制式差动发送机
（a）机电型CDX；（b）固态型SSCDX

SSCDX的原理框图如图5.15-51所示。它是由两个SSCT、共同的一组输入Scott-T型变压器和象限转换开关组成的。这两个SSCT的sin信号和cos信号输入互换了位置，从而在两个减法放大器中分别完成$\sin(\theta-\phi)$和$\cos(\theta-\phi)$。

固态自整角差动发送机SSCDX特别适用于计算机控制系统，用来对机电型自整角机或旋转变压器输出信号进行角

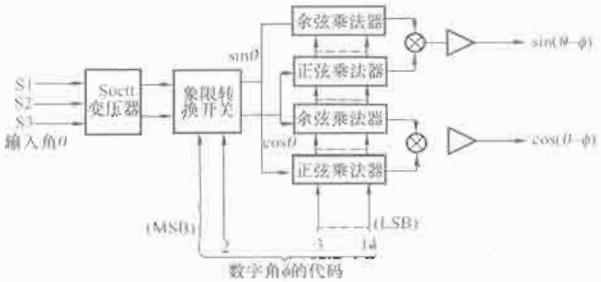


图5.15-51 固态控制式自整角差动发送机原理框图

度补偿或校正。

5.1.3　固态自整角机发送机和数字/自整角机（旋转变压器）转换器

同样机电式控制式自整角发送机 CX 可以用固态自整角发送机 SSCX 代替，将输入角的二进制数码转换成自整角机信号或旋转变压器信号。SSCX 是一种特殊的数/模转换器，称为数字自整角转换器 DSC 或旋转变压器转换器 DRC，其原理框图如图 5.15-52 所示。

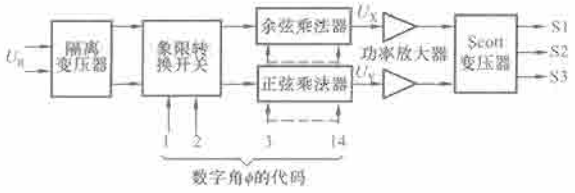


图 5.15-52　固态控制式自整角发送机原理框图

5.1.4　用单片微处理机实现轴角/数字转换

目前单片微处理机价格便宜，功能完善，应用广泛，轴角/数字转换的原理和方法也可用微处理机来实现。这里介绍一种使用单片微处理机实现轴角/数字转换的基本结构组成和程序设计方法，供使用者工程设计时参考。

（1）硬件结构

图 5.15-53 给出了由单片微处理机构成的同步机/数字转换装置的硬件结构。它主要由自整角机、衰减电路、模拟多路开关、过零检测电路、采样保持器、A/D 转换器、单片微处理机及其输出接口电路组成。

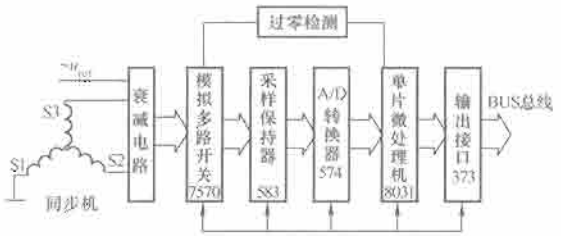


图 5.15-53　由单片微处理机构成的 S/D 转换硬件结构

（2）转换原理和程序设计

1）转换公式。自整角机输出经衰减后加到转换器的信号型式为

$$\left.\begin{aligned} u_{s1} &= u_m \sin\theta \sin\omega t \\ u_{s2} &= u_m \sin(\theta+120°)\sin\omega t \\ u_{s3} &= u_m \sin(\theta-120°)\sin\omega t \end{aligned}\right\} \tag{5.15-25}$$

式中，u_m 为参考电压幅值（衰减之后），V；ω 为参考电压角频率，Hz；θ 为机械转角（°）。

以 u_{s1} 相为基准采样线电压，其幅值分别为

$$\left.\begin{aligned} u_{21} &= u_y = -\sqrt{3}u_m \sin(\theta-30°) \\ u_{31} &= u_x = \sqrt{3}-u_m \sin(\theta+30°) \end{aligned}\right\} \tag{5.15-26}$$

则

$$\left.\begin{aligned} u_y + u_x &= -\sqrt{3}u_m \sin\theta \\ u_x - u_y &= -\sqrt{3}u_m \cos\theta \end{aligned}\right\} \tag{5.15-27}$$

取

$$\frac{u_y+u_x}{u_x-u_y} = \frac{-\sqrt{3}U_m \sin\theta}{-\sqrt{3}U_m \cos\theta} = \tan\theta \tag{5.15-28}$$

2）程序框图。根据式（5.15-23）～式（5.15-25）以及象限码即可编制程序框图，如图 5.15-54 所示。

3）根据以上所述转换原理和程序设计思想，即可构成功能完善的 S/D 转换装置。按上述原理，不难实现粗、精双通道转换。这种转换装置可方便地用于机床、工业机器人以及军用伺服系统中。

5.1.5　模块化自整角机/旋转变压器-数字转换器

目前市场上所见到的模块化轴角转换器（以下简称 S/R-D 转换器）主要有两种类型：跟踪式转换器和采样逐次逼近式转换器，前者可用来构成单通道轴角/数字转换系统，后者可用来构成多通道轴角/数字转换系统。在设计系统时只有正确地选用和设计转换系统，才能真正发挥模块化的特点。不正确的使用往往达不到器件所给定的性能指标。

（1）跟踪式 S/R-D 转换器

跟踪式 S/R-D 转换器包括那些以自整角机和以旋转变压器作为位置测量元件，但都是按照跟踪反馈式原理工作的轴角/数字转换器，两者的差别在于：自整角机/数字（S/D）转换器模块的输入端有一个微型斯科特变压器，它可以把自整角机型式的三相输入信号变换成适合转换器需要的两相信号；而旋转变压器/数字（R/D）转换器模块的输入端是一个隔离变压器。图 5.15-55 是跟踪式 S/D 转换模块的原理框图。其核心环节是数字正余弦乘法器、相敏解调器、积分

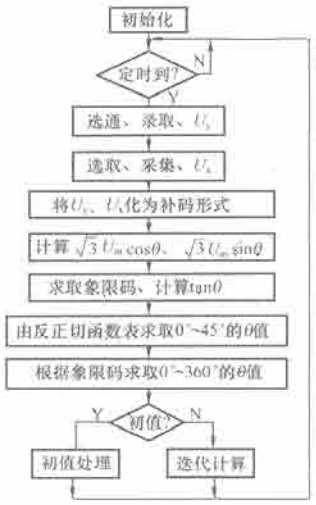


图 5.15-54　单片微处理机实现的 S/D 转换程序框图

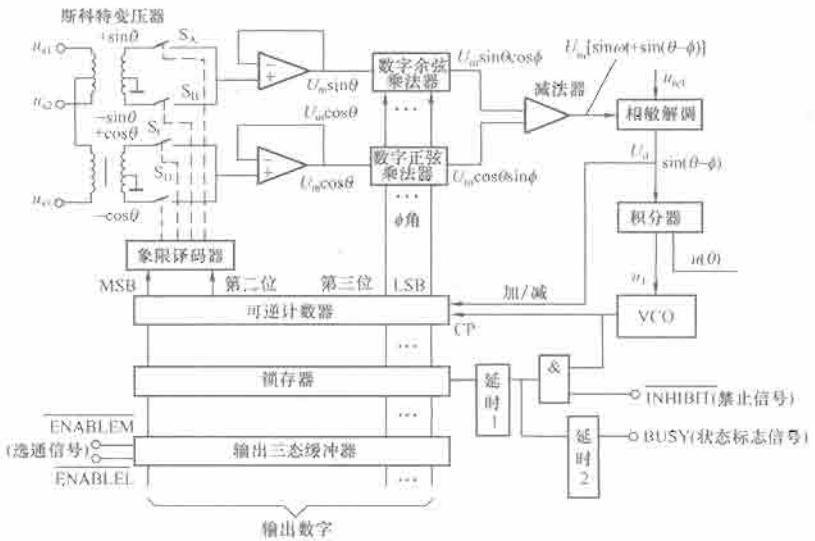


图 5.15-55　跟踪式 S/D 转换模块原理图

器（频率整形电路）、压控振荡器（VCO）和可逆计数器，它们组成一个数字伺服系统。

跟踪式 S/R-D 转换器中计数器的输出数据连续地跟踪输入轴角的变化，为了得到稳定、可靠的并行输出数据，转换器中必须具备相应的数字接口电路，它包括输出锁存器、输出三态缓冲器、延时电路和控制门。接口电路的主要功能是：在输出数据期间，封闭锁存器的输入端，以保证输出数据不受轴角变化的影响；把可逆计数器输出端的串行变化转换成并行格式的输出数据。

（2）采样逐次逼近式 S/R-D 转换器

如果一个采样伺服系统中有多个轴角需要测量，使用采样逐次逼近式 S/R-D 转换器比使用上述跟踪式转换器可以获得更好的性能价格比。这种转换器结合了跟踪反馈和逐次逼近两种方法，它不是对自整角机/旋转变压器的输出信号 e_s 和 e_c 直接进行转换，而是对这两个电压的采样值进行转换，因而它可以对多个自整角机/旋转变压器的输出信号进行分时转换。图 5.15-56 为采样逐次逼近式转换器的原理框图，左半部分为信号输入模块，右半部分为中心转换器模块。

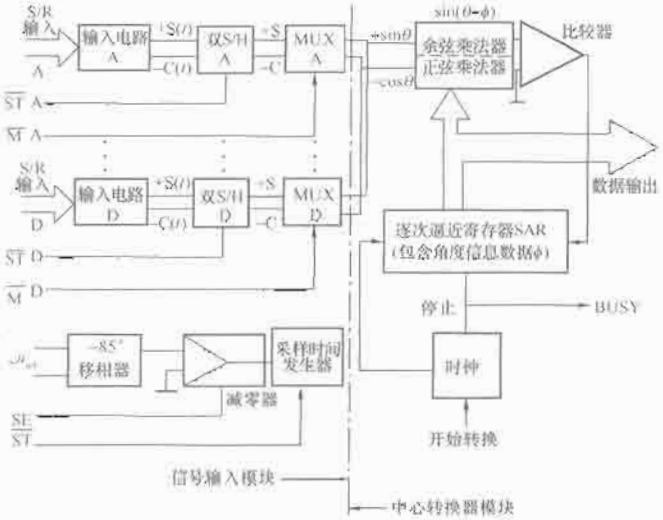


图 5.15-56 采样逐次逼近式 S/D 转换模块原理框图

5.1.6 模块化轴角/数字转换器的选用和系统设计中的有关问题

图 5.15-57 所示为一个自整角机轴角/数字转换系统。在这一系统中，S/D 转换器相当于控制式自整角机系统中的接收机，它接收发送机输出的三相交流信号，并输入自整角机的励磁电压，从 S/D 转换器的输出端可直接得到被测轴角 θ 的数字量和被测轴角角速度 $d\theta/dt$ 的模拟量，而无需进行任何中间解算。如果使用旋转变压器作轴角传感器，则应用旋转变压器/数字（R/D）转换器模块，系统其他部分不变。然而，在实际中为构成一个满足给定技术指标的、且具有轴角/数字转换器作为位置测量的伺服系统，切不可盲目地确定模块化轴角/数字转换器，而应与系统总体性能相匹配，必须考虑以下若干实际问题。

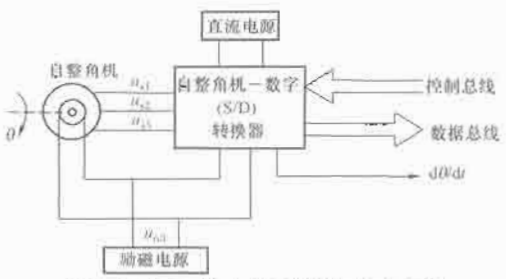


图 5.15-57 模块化 S/D 转换系统图

（1）转换器模块的分辨率

轴角/数字转换器系统的分辨率定义为系统所能分辨的最小角度变化，它取决于传感器的静误差和转换器模块的分辨力。实际工程中，测角系统的分辨率 $\Delta\theta_m$ 不应大于控制系统要求的静误差角 ε_0 的一半，当不能满足此要求时，可采用粗精组合的方法来提高分辨力。

（2）转换器模块的精度

轴角/数字转换系统的精度通常用其输出数字的加权值（所代表的角度值）与实际轴角之间的绝对差值来表示。由于跟踪式转换器采用比率方式转换，所以它的精度指标可在很宽的条件下满足。这些条件包括信号电压和参考电压的幅值变化不大于 10%，波形失真不大于 10%，参考电压的频率漂移不大于±10%，电源电压漂移不大于±5%。转换系统的精度指标对闭环控制并不十分重要，但它决定了开环系统的精度。

（3）转换器模块的加速度品质因数

伺服控制系统的轴角并不总是匀速变化的，当它加速或减速时，跟踪式转换将出现滞后误差，滞后量与轴角加速度成正比，并与转换模块的加速度品质因数成反比。若使用较高励磁频率模块，则可取得较大的加速度品质因数。

（4）转换模块的跟踪频率

在采用轴角/数字转换器模块的伺服系统中，所选转换模块的跟踪速率应大于可能出现的最高轴角速度，应避免出现速度误差。

（5）对传感器容许相位移的限制

输出电压的方程式是在假定旋转变压器和自整角机的输出信号与励磁（参考）电压之间没有相移的前提下导出的。实际上自整角机和旋转变压器的输出信号与励磁信号之间存在不同程度的相移，前者相移较小，后者相移较大，结果使转换器产生动态误差，其值可由下式估算

$$\Delta\varphi_d = \frac{\text{输入轴角速度（r/s）}\times\text{传感器相移（°）}}{\text{参考电压频率}} \quad (5.15\text{-}29)$$

若把施加到转换器模块上的励磁参考电压预置一个适当的超前相位，则可抵消这一误差。许多转换器已在模块内部进行预补偿，因而也限定了所用的传感器的相移上限，如果其相移超过补偿量，仍然会出现动态误差。

（6）励磁频率（参考频率）的选择

在使用自整角机或旋转变压器的轴角/数字伺服系统中，转换模块应与传感器使用同一个励磁（参考）电压。就转换模块而言，使用的参考电压频率越高，其动态性能就越好，不同规格的转换器只适应于一定频率范围内的参考电压，不能随意提高或降低。

（7）励磁（参考）电压和信号电压幅度的选择

转换器模块的输入信号包括传感器输出的交流信号电压和励磁交流电压，这些电压的输入端都设置有隔离电路，或者是变压器式的（低频时）或者是电子式的。它们都只能承受一定幅度的电压，因此对各种规格的转换器模块都规定了信号电压和励磁电压的幅值，输入电压比额定值小得多时，转换器的精度指标和动态指标都不能保证。当输入电压比额定值高时，必须在每个信号输入端和励磁电压输入端串入适当的衰减电阻，电阻的阻值由每个信号回路的输入阻抗和应该衰减的电压值来决定。

（8）多通道轴角/数字转换系统

如果一个采样伺服系统中有几个轴角量需要测量和控制，可以为每个自整角机或旋转变压器配置一个跟踪式转换

模块，但更合理更经济的方案是采用多通道转换器（逐次采样逼近式转换器）。若采用后者，则各个自整角机（或旋转变压器）应使用同一个励磁电压源，具有相同幅值的信号输出。

（9）其他

以上介绍的仅为自整角机或旋转变压器作为位置传感器的两种模块化转换器在系统设计中的有关问题。此外，对于跟踪速率较高的转换器模块，还可以使用感应同步器作传感器；在需要高分辨率的场合，还可使用双通道（粗精结合）自整角机或旋转变压器-数字转换器；在模拟直流伺服系统中，还可使用自整角机或旋转变压器-线性直流转换器。另外，使用数字-自整角机或旋转变压器转换模块可把系统输出的角度数据还原成自整角机型式的三相交流信号或者还原成旋转变压器型式的两相交流信号。

5.2　差动变压器式传感电机

变压器式传感电机本身是互感系数可变的变压器。它用交流励磁，且普遍使用中频。当一次绕组接入励磁电源后，二次绕组就有感应电压输出。互感变化时，输出电压将相应变化，一般这种传感电机二次绕组有两个，把它们反向串联后，作为输出绕组，输出绕组输出的总电压应当等于两个二次绕组各自电压的差值，这种接线方式是差动式的，故称为差动变压器式传感电机。差动变压器式传感电机是基于变压器的原理，将机械位移（线位移和角位移）变换成与位移成比例的电信号，在自动控制系统中，特别是在陀螺仪表和小位移装置中得到了广泛的应用。

5.2.1　截面型差动变压器式传感电机

截面型差动变压器是一种常见的变压器传感电机，它是通过磁路气隙截面积的变化而使互感发生变化。图 5.15-58 是一种简单的截面型差动变压器的结构。图 5.15-59 是导磁体主要尺寸示意图。它有两个用铁磁材料叠片制成的导磁体，即扇形的衔铁和对称的 E 形铁心。它们与工作气隙一起构成磁路。在铁心的三个心柱上都绕有线圈，中间心柱上是励磁绕组 W_f，与交流电源相接。左右两侧心柱上是两个匝数相等的线圈 W_0，它们反向串联后作为输出绕组。这种类型传感电机工作原理的关键在于气隙磁路截面积的变化引起磁导的变化。当衔铁处于定子 E 形铁心的对称位置时，由于两侧磁路对称，其磁导相同，两个分支磁通 Φ_1 和 Φ_2 相同。因而在两个输出绕组中的感应电动势也相等，输出电压 U_0 将为零。当衔铁偏离对称位置时，例如向左偏转转角 α 时，左侧气隙截面积增加而使磁导增大，磁通增大，其线圈中感应电动势增大；与此同时，右侧气隙截面积减小而使磁导减小，磁通减小，线圈中感应电动势减小，作为两感应电动势差值的输出电压将不为零，相位与左侧线圈感应电动势相位相同。衔铁移动的方向相反，两个输出绕组中感应电动势增大和减小的情况将相反，输出电压的相位也相反。采用解调电路后输出不同极性电压。这样，截面积差动变压器便将转角变换成电信号。

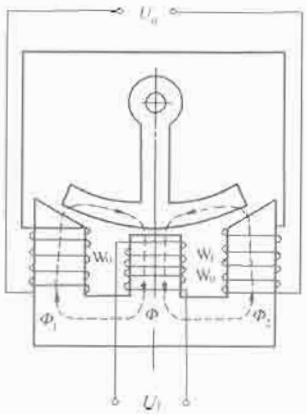


图 5.15-58　截面型差动变压器结构

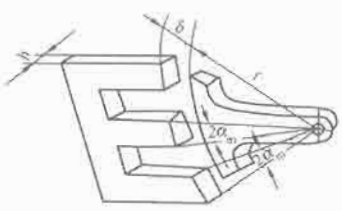


图 5.15-59　导磁体主要尺寸示意图

经过定量分析可求出截面型差动变压器输出电压有效值 U_0 与转角 α 的关系为

$$U_0 = K\alpha \tag{5.15-30}$$

$$K = 2\pi f N_f N_0 I_f \frac{\mu_0 hr}{\delta} \tag{5.15-31}$$

式中，f 为励磁电源频率，Hz；N_f、N_0 为励磁绕组与输出绕组匝数；I_f 为励磁电流，A；μ_0 为真空磁导率，$\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-8}$，H/cm；$h$ 为变压器铁心有效厚度，cm；r 为衔铁的旋转半径，cm；α 为衔铁偏离对称位置的转角，rad。

为了保证线性度，励磁电流的频率 f 和大小 I_f 应恒定。当 3 个铁心柱的极弧夹角都是 $2\alpha_m$，保证精度的转角范围是 α_m，即 $-\alpha_m \leqslant \alpha \leqslant \alpha_m$。

5.2.2　微动同步器（RVDT）

微动同步器是一种磁阻式线性旋转变压器，依靠改变磁路气隙截面而改变磁路磁导，并按照差动变压器原理工作。转子铁心一般是两极结构型式，铁心上没有绕组，定子极数可以是 4、8、12、16 极，常用的是 4 极和 8 极。图 5.15-60 所示为 4 极微动同步器，它的定子有四个凸磁极，在每个极上都装有一个励磁绕组和一个输出绕组。转子形状如图所示，有两个极，每个极弧为 90°。

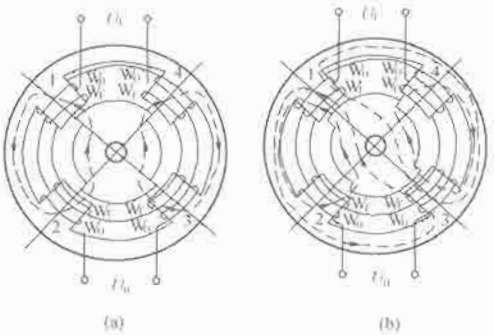


图 5.15-60　四极微动同步器结构原理图

定子各极上励磁绕组的连接应使定子上的磁通方向如图 5.15-60 所示。各输出绕组的连接应使得空载输出电压的有效值 U_0 与极上的输出绕组中的感应电动势有效值 E_{01}、E_{02}、E_{03} 和 E_{04} 间满足关系式 $U_0 = (E_{01} + E_{03}) - (E_{02} + E_{04})$。

若微动同步器的制造尺寸精度对称，当转子处于中间对称位置时，如图 5.15-60（a）所示，由于四个极下的气隙磁导都相同，因而在输出绕组的各线圈中感应电动势也相等，输出绕组输出端上的电压 U_0 将为零。如果转子向逆时针方向转动某一个角度，如图 5.15-60（b）所示，则在 1、3 磁极上的线圈中感应电动势将增大，而在另两个磁极 2、4 上的线圈中感应电动势将减小，因此，输出电压将不为零。输出电压的相位将与 1、3 磁极上的线圈中的感应电动势相位

相同。当转子转动方向相反时，输出电压的相位也将反过来。采用解调电路可区别出不同相位。

设励磁电流的频率和有效值为 f、I_f，4个励磁绕组匝数都是 N_f，4个输出绕组匝数都是 N_0。并设定子磁极宽度用夹角 $2\alpha_m$ 表示，转子磁极半径为 r，工作气隙长度为 δ，铁心有效厚度为 h，则输出电压有效值 U_0 与转角 α 的关系为

$$U_0 = K\alpha \tag{5.15-32}$$

式中，灵敏度

$$K = 8\pi f N_f N_0 I_f \frac{\mu_0 hr}{\delta} \tag{5.15-33}$$

输出电压的有效值（或幅值）与转角大小成正比。转角方向不同时，电压改变符号，说明输出电压反向。输出电压的相位与幅值大的绕组感应电动势相同。当结构参数相同时、4极微动同步器的灵敏度是图 5.15-58 所示的简单差动变压器的灵敏度的四倍。而且微动同步器的许多性能都比它好。

微动同步器的体积小，结构可靠，分辨力高，是一种无接触式角度输出装置，工作寿命长。但它测量的角度范围比较小，最高达38°左右，而输出信号是交流，一般要经过整流和放大，因此线路比较复杂。近年来直流微动同步器开始应用。它是将直流电压输入通过振荡器变为交流励磁电压，输入到励磁绕组。输出绕组的感应电动势通过全波整流变为直流输出。这样可以完全补偿因交流电压输出的波形失真和相位不一致等所造成的零位误差。其线路如图 5.15-61 所示。

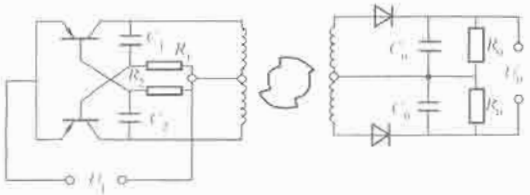


图 5.15-61 直流微动同步器线路图

5.2.3 螺管型差动变压器（LVDT）

螺管型差动变压器的结构如图 5.15-62 所示，主要包括一次线圈（一次绕组、励磁线圈）、二次线圈（二次绕组、检测线圈）和磁心三部分。按一次、二次线圈排列型式，有二节式、三节式、四节式和五节式等。三节式的零位电压较小、二节式比三节式灵敏度高，线性范围大。多节式线圈主要是为了使螺管内部磁通分布更加均匀，改善传感器的线性度。如四节式和五节式就可以改善传感器的线性度。

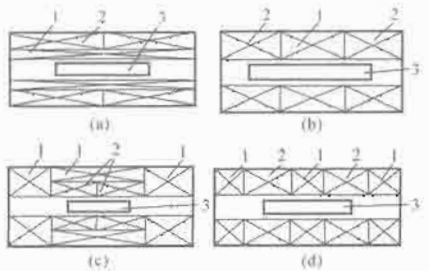


图 5.15-62 螺管型差动变压器结构

(a) 二节式；(b) 三节式；(c) 四节式；(d) 五节式

1—一次线圈；2—二次线圈；3—磁心旋转变压器

在众多的结构型式中，最常用的是二节式和三节式。二节式的特点是一次和二次线圈同心地耦合在一起，一次线圈安排在内层，以便得到更大的长径比，从而提高传感器的灵敏度和线性度。二次线圈安排在外层，两个二次线圈反向串联后输出电动势。磁心移动的作用在于改变磁感应强度，从而改变二次线圈的输出电压。对于三节式，设 E_{01}、E_{02} 是两个二次线圈感应电动势有效值。它们反向串接时，空载输出电压 $|U_0| = |E_{01} - E_{02}|$ 呈 V 形特性，如图 5.15-63 所示。图中 x 表示磁心偏离中心位置的距离。

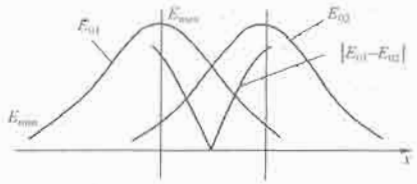


图 5.15-63 螺管型差动变压器输出特性

螺管型差动变压器一次线圈的供电电源有两种：一种是采用恒流源供电；另一种是采用恒压源供电。理论分析表明，采用恒压源供电时传感器的线性度比采用恒流源时要好。

恒压源供电时螺管型差动变压器空载输出电压有效值为

$$U_0 = K\frac{N_0 U_f}{N_f}x \tag{5.15-34}$$

式中，U_f 为励磁电压有效值；x 为线位移；K 为系数，由传感器的结构尺寸决定。

螺管型差动变压器的灵敏度较低，但其测量范围较大，常用的是几毫米到几十毫米。大量程的差动变压器，测量范围已有 1m 以上规格。螺管型差动变压器的线性度较高，可达 0.1%，制造装配也较方便，获得了广泛的应用。

5.3 旋转编码器

5.3.1 分类

旋转编码器是一种直接编码式的测量元件。它可直接把被测转角或位移转换成相应的代码，用来测量转角并把它转换成数字型式输出信号。

1）按信号转化的媒体（介质）分类，旋转式编码器可分为接触式和非接触式两大类。

① 接触式主要是指电刷式编码器，是比较早的产品，分辨率较低，现较少应用。

② 非接触式编码器主要有光电式和磁电式。光电式编码器是通过光电转换及莫尔条纹的原理，将位移变化量转换成电量，其光源有红外和可见光两种。近年又出现了激光编码器。它是将光电编码器的光源部分改为激光器，但由于其价格昂贵，一般只应用于高分辨率测量场合；磁性编码器中，用得最多的是这样两种类型：磁敏电阻式和励磁磁环式。磁敏电阻式又可分为强磁敏电阻式和半导体磁敏电阻式。其中，强磁金属磁敏电阻式发展最快。

2）按信号输出特征分类，通常将旋转编码器分为增量式、绝对式和混合式。

3）按外形和机械接口又可分为有轴和无轴两类。有轴编码器可分为实心轴和空心轴两种。有轴编码器一般需要有弹性联接器与用户轴连接，而无轴式是一种组合式编码器，它和空心轴编码器一样，需安装在应用机械的轴上。

4）按电信号特性可分为数字式编码器和模拟式编码器。绝对式编码器基本上是数字式输出型式；增量式编码器两种都有，其模拟输出型又称正弦波编码器，一般应用于进一步细分的场合。因此，模拟式编码器对整机的精度和信号输出的等幅性、正弦性、正交性等指标要求十分严格。

5.3.2　结构和工作原理

（1）光电式增量码盘

光电式增量码盘的结构原理如图 5.15-64（a）所示。结构中最大的部分是一个圆盘，圆盘上刻有均匀分布的辐射状窄缝，窄缝分布的周期称为节距，记为 L。与圆盘对应的还有两组检测窄缝，它们的节距和圆盘上的节距是相等的。检测窄缝与圆盘的配置如图 5.15-64（b）所示。a、b 两组检测窄缝的位置相隔（$K\pm1/4$）节距，其目的是使 A、B 两个光电转换器的信号在相位上相差 90°。两组检测窄缝是固定不动的，圆盘与被测轴相连。

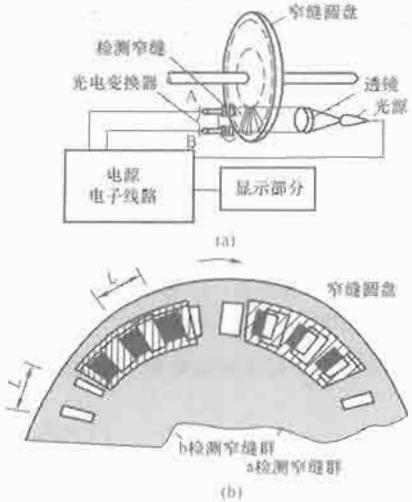


图 5.15-64　光电式增量码盘结构原理图

当圆盘随着被测物体转动时，检测窄缝不动，光线透过圆盘窄缝和检测窄缝照到光电转换器 A 和 B 上。显然，码盘转动时通过检测窄缝群的光线强度随转角做周期性的变化，所以光电转换器输出的电流信号随转角做周期变化，变化周期为窄缝的节距 L。周期信号可分解为基波与谐波之和，谐波小时，可以用基波的正弦信号作为光电转换器的输出信号。光电转换器 A 和 B 这两路信号经逻辑电路处理、计数后就能得到转角和转速，并可以辨别转动方向。

增量码盘开机通电后，输出的脉冲数字相对于起始位置，一般是随机位置，所以此时输出的角位置数字没有实际意义。只有在寻找到零位并将显示数字清零后，输出的脉冲数字才表示转角的绝对位置，必须先要有一个寻零过程。这是增量码盘的一个缺点。此外在脉冲传输过程中，若由于干扰而丢失脉冲，或有干扰脉冲窜入时将会产生误差，此误差不会自行消除。这一点，不如采用鉴相型处理方式的感应同步器。

增量码盘一般有 3 个输出端，分别称为 A 相、B 相和 Z 相。A、B 两相的信号就是图 5.15-65 中两个光电转换器 A、B 的输出信号，相位差 90°。它们往往被处理成相位差是 90° 的方波，即如图 5.15-65 中 a、b 的方波信号。Z 相送出的脉冲就是零位脉冲，用它控制可逆计数的清零端。

（2）光电式绝对值码盘

光电式绝对值码盘由三大部分组成，如图 5.15-66 所示，它包括旋转的码盘、光源和光电敏感元件。码盘上由一系列同心圆组成光学码道，每个码道上有按一定规律分布的、由不透明区构成的光学码道图案，它们是由涂有感光乳剂的玻璃质（水晶）圆盘利用光刻技术制成的。光源是超小型的钨丝灯泡或者是一个固定光源。检测光的元件是光敏二极管或光敏三极管等光敏元件。光源的光通过光学系统，穿过码盘的透光区，最后被窄缝后面的一排径向排列的光敏元件接收，使输出为逻辑“1”；若被不透明区遮挡，则光敏元

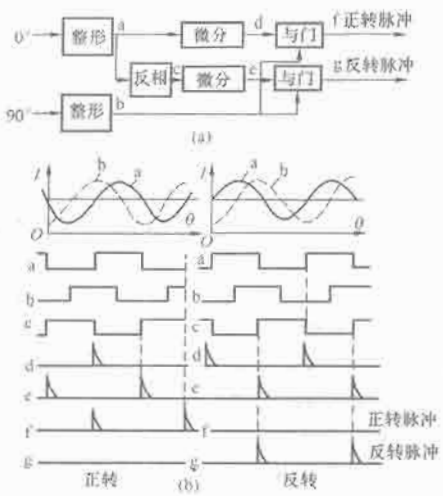


图 5.15-65　光电增量码盘信号处理电路框图和信号波形图

件输出低电平，代表逻辑“0”。对于码盘的不同位置每个码盘都有自己的逻辑输出，各个码盘的输出编码组合就表示码盘的转角位置。

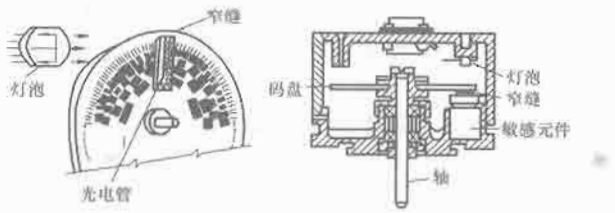


图 5.15-66　光电式绝对值码盘

对于各码道的输出信号，有几种不同的编码方式。图 5.15-67 为二进制码盘，每一个码道代表二进制的一位，最外层的码道为二进制的最低位，越向里层的码道代表的位数（权）越高，最高位在最里层。之所以这样分配是因为最低位的码道要求分割的明暗段数最多，而最外层周长最大，容易分割。显然码盘的分辨率与码道多少有关。如果 N 表示码盘的码道数目，即二进制位数，则角度分辨率为 $\Delta\theta=360°/2^N$。目前高精度绝对值码盘一般为 19 位，更高精度的可达 21 位。

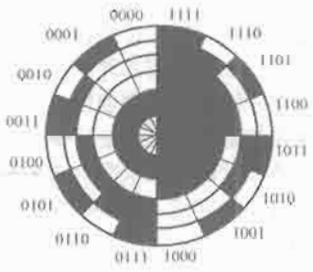


图 5.15-67　二进制码盘



图 5.15-68　二进制循环码码盘

二进制编码有一个严重的缺点，在两个位置交换处可能产生很大的误差。这种误差叫非单值性误差或模糊。对这种现象可以采用特殊代码来消除。常用的一种编码方法叫做循环码（如格雷码）。采用二进制循环码——格雷码的码盘示意图如图 5.15-68 所示。循环码是无权码，其特点为相邻两个代码间只有一位数变化，即二进制数有一个最小位数的增量时，只有一位改变状态，因此产生的误差不超过最小的“1”个单位。但是，将格雷码转换成自然二进制码需要一个

附加的逻辑处理转换装置。

(3) 光电式混合码盘

目前流行一种新型绝对值码盘，它内部还具有增量码盘的结构，也称为混合式码盘。基本结构是绝对值码盘，但码道较少，精度较低，起“粗测”作用。而增量码盘部分起到“精测”作用。

这种码盘具有如下优点：从码盘输出到信号处理装置的是模拟信号，其抗干扰能力优于纯光电增量码盘的脉冲信号；一通电就知道绝对值位置，不必“寻零”；采用了增量码盘结构，并可对其输出信号进行倍频处理，测量精度高；体积要比同精度的纯绝对值码盘小。

(4) 强磁金属磁敏电阻磁性编码器

利用强磁金属磁阻效应读出磁信号做成的编码器，称为强磁金属磁敏电阻磁性编码器。图 5.15-69 是基本结构示意图。磁鼓 1 的基材是铝合金，外表面包有一层作为磁记录媒体的永磁材料。在磁记录媒体上严格等距地录以极性相间的磁化信号。磁敏电阻元件用来传感、记录不同位置时磁记录媒体的磁场变化情况。磁敏传感部件 3 是由几组磁敏元件组成的，在增量式编码器中，至少应该有三组：A、B 和 Z。A、B 为相位差 90°电角度的信号输出通道，Z 为每转输出一个信号的通道，如同在光电编码器中那样，作为基准参考零位信号。磁鼓与磁敏电阻元件之间的气隙一般为十至数百微米。

磁鼓上磁记录媒体磁信号的磁场情况如图 5.15-70 所示。磁敏电阻单轴薄膜轴向地面对磁场，每个磁敏电阻元件的两部分相距 $\tau/2$ 间距，也就是相差 90°电角度。

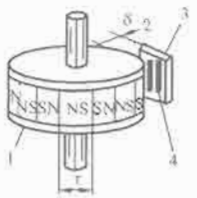


图 5.15-69 强磁金属磁敏电阻磁性编码器结构图
1—磁鼓；2—气隙；3—磁敏传感部件；4—磁敏电阻元件

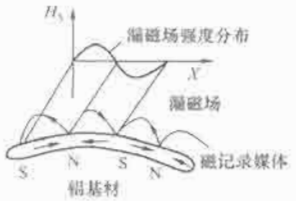


图 5.15-70 磁鼓磁场分布示意图

为了使磁化信号的磁通穿过气隙到达磁性传感器上，要求磁性媒体层具有良好的磁特性，一般媒体层的厚度要达到数十微米以上。通常磁鼓表面气隙磁场的磁通密度较低，一般 0.003～0.005T，可以采用薄膜类磁性媒体满足其要求。

磁鼓表面的磁信号是通过特殊设计的写磁头写到永磁磁性媒体上的，这种磁头的充电电流应能产生的场强为 80kA/m以上。每一对磁极对应磁头的一个脉冲，磁鼓上磁极角度位置和磁头充电脉冲同步进行。计算机编程控制磁化系统、不同极数可以写到任何尺寸的磁鼓上。

(5) 半导体磁敏电阻磁性编码器

综合利用半导体的磁阻效应而制成的编码器就是半导体磁敏电阻磁性编码器。和强磁金属磁敏电阻器件相比，半导体磁敏电阻的器件具有很高的电阻相对变化率。半导体磁敏电阻磁性编码器在原理和构造上，和强磁金属磁敏电阻磁性编码器有许多共同和相似之处，半导体磁敏电阻磁性编码器主要由半导体磁敏电阻传感器件和齿形转子两部分组成。图 5.15-71 示出半导体磁敏电阻传感器件的结构图。该传感器件也有三种信号输出：A、B（每转多个信号）和 Z（每转一个信号）。由于半导体磁敏电阻元件的电阻值在磁场中随磁通密度大小的变化很大，输出信号也相当大，因此在构成电路时，出于降低成本的考虑，有时采用一个半导体磁敏电阻元件和一个固定电阻相配组成一对。磁敏电阻都是放在永久磁铁的磁极上。磁敏电阻的输入、输出端都是接到由保持架固定的印制电路板上。

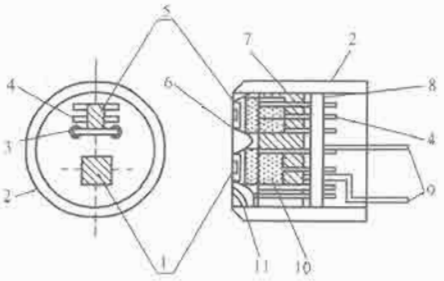


图 5.15-71 半导体磁敏电阻传感器件结构
1—A 相和 B 相的阻导体磁敏电阻；2—机壳；3—Z 相引线；4—引线架；5—Z 相的阻导体磁敏电阻；6—检测面；7—保持架；8—印制电路板；9—输入与输出端；10—永磁体；11—绝缘膜

图 5.15-72 示出半导体磁敏电阻磁性编码器结构原理和

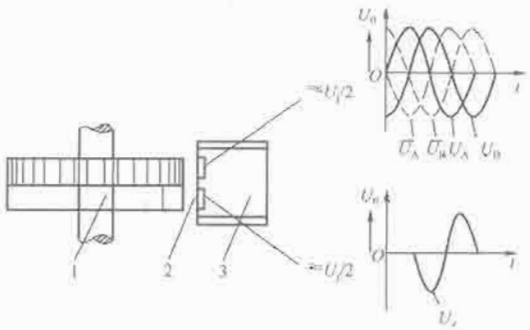


图 5.15-72 原理图和输出波形
1—齿轮转子；2—气隙；3—半导体磁阻传感器件

输出波形。齿形转子 1 是由软磁材料制成的，外表面由精确等距的交替的齿和槽构成，它的齿距应和传感器件上的极距相对应。永久磁铁发出的磁力线穿过半导体磁阻元件而进入与它相近的齿形转子上，但不会进入到齿形转子的槽中。当齿形转子转动时，由于极下交替地通过齿和槽，磁阻发生变化，永久磁铁的磁通也交替地变化。这样位于永久磁铁上的半导体磁阻元件通过的磁通和磁通密度也交替地在低和高之间变化，磁极对着槽时，磁通密度小，磁极对着齿时，磁通密度高。如果以 L 表示齿距（齿形转子齿距），半导体磁敏电阻元件应是半个 L 宽度。这样当齿形转子转动时，半导体磁敏电阻元件的输出将按图 5.15-73 所示的关系变化。

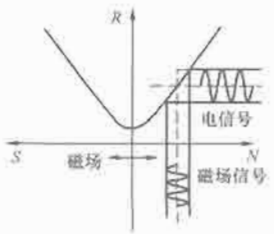


图 5.15-73 磁场和半导体磁敏电阻元件间信号变化关系

(6) 励磁磁环式磁性编码器

励磁磁环式磁性编码器通常又称为磁栅，它和光栅编码器相对应。励磁磁环式磁性编码器也有若干种型式，但其原理、结构大致相同，这里仅介绍其中的一种。励磁磁环式磁性编码器主要由机壳、磁码盘组件和读出组件三部分组成，如图 5.15-74 所示。

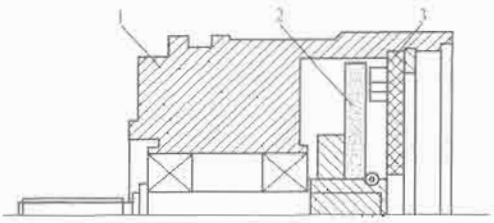


图 5.15-74　励磁磁环式磁性编码器结构示意图
1—机壳；2—磁码盘组件；3—读出组件

机壳是连接磁码盘组件和读出组件的关键部件，因此结构设计时要考虑磁码盘组件的旋转精度和读出组件中传感元件的位置精度。磁码盘组件由磁码盘和转轴组成，磁码盘的非磁性基板上涂覆永磁材料。这种材料和磁记录设备中使用的一样，如磁性氧化铁、钡铁氧体磁粉等。在它上面按一定规律分成磁化和非磁化的区域，如同在光电编码器中透光和不透光的一样。磁化的方法可以采用充磁头脉冲磁化或进行刻蚀的办法。

磁码盘上磁信号和读出组件之间相互位置关系有两种。一种是在磁码盘外圆上磁化有磁信号，读出组件置于外圆上，如图 5.15-75（a）所示。另一种是在磁码盘的侧面磁化有磁信号，读出组件在侧面相对于磁信号，如图 5.15-75（b）所示。增量式磁信号码道可以采取外圆磁化，也可采取侧面磁化。但是对于绝对值磁信号码道，采用侧面磁化的型式更为合适。码道磁化的工作面必须尺寸精确、平整，不能有缺陷。码道脉冲信号中心必须与旋转中心严格同心。磁场强度一般控制在 10mT，图形的边缘要清楚，整个范围内磁通密度应该均匀一致。磁化区与非磁化区的占空比一般取为 1∶1，也可根据特殊要求而定。

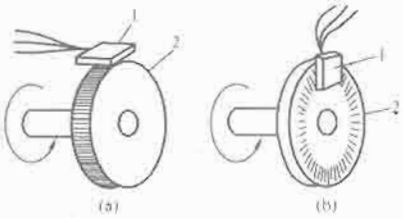


图 5.15-75　磁码盘磁信号分布结构示意
（a）外圆磁化；（b）侧面磁化
1—读出组件；2　磁码盘

图 5.15-76 是励磁磁环式磁性编码器电气信号产生原理图。绕有两组绕组（一次绕组和二次绕组）的磁环置于磁性码道的上方，如图 5.15-76（a）所示。对一次绕组施以高频的励磁电压，频率一般为 20～200kHz，它在磁环中产生一个交变的磁场。这个交变的磁场在二次绕组中感生一个交变的电动势。在磁码盘转动时，磁码盘磁性码道上有磁部分与无磁部分交替地相对于磁环。磁环由具有矩磁特性的材料制成，其特性曲线如图 5.15-76（b）所示。当磁环面对非磁化区时，适当设计，使得磁路不进入饱和区，磁环的磁状态是在矩形区内，磁环内的磁通只有交变分量。这样在二次绕组中就会感生出一个同频率的交变电动势。图 5.15-76（a）～（d）左侧的图形相当于上面描述的状态。当磁环面对磁码盘磁性码道上磁化区时，磁化区域的磁通将穿过磁环，使得磁环饱和磁化。这时磁环磁路的工作点由原来的 R-R′点，偏移到 S 点，如图 5.15-76（b）右侧曲线所示。由于饱和的缘故，励磁电流所产生的交变磁通分量很小，如同图 5.15-76（d）右侧曲线所示。信号的幅值与一、二次绕组的匝数比有关，也与磁环靠近磁鼓时环中产生的磁场有关。

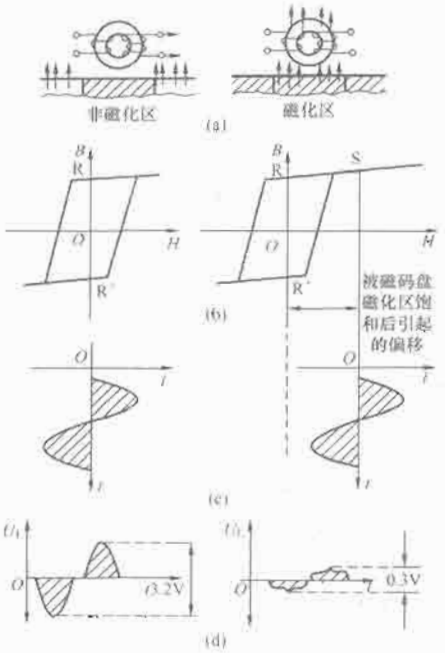


图 5.15-76　励磁磁环式磁性编码器电气信号产生原理图

磁环面对磁性码道上非磁化区时，二次绕组输出高电平；面对磁化区时，二次绕组输出低电平，这样就构成了二进制中的"1"和"0"。输出信号是一个和励磁频率一致的调频信号。这个信号经过调节，变成单一电平，再经过施密特触发电路变成方波信号。

5.3.3　选型和使用

（1）按不同用途选择不同的编码器

1）绝对式编码器输出二进制码，数据在 1 周内有效，并有数据记忆功能，适合做角度测量用。

2）增量式编码器可以进行多周数据递增或递减记数，适合对速度、加速度、线位移量、角度量的测量。

3）混合式编码器是增量式并附有电机电极位置信号（如 U、V、W 信号），适合与交流伺服电机配套。

（2）适当选择分辨率

编码器的分辨率（如增量式从 10P/r 至 25000P/r）有高有低，选择的原则是在满足测量精度的前提下，应就低不就高，不可盲目追求高分辨率。如测量速度时，应选择 60P/r（每转脉冲数）或 600P/r，根据调速范围来确定。线位移测量，选择十进制数如 100P/r、1000P/r。在数据处理时，避免出现非整除、差补现象。

（3）机械接口的选择

编码器的主轴有 3 种：实心轴、空心轴、无轴。空心轴适合与电机轴直接连接，便于安装；无轴式适合与轴向窜动量小的电机相配；一般情况下选择空心轴（采用联轴节连接）即可。

机械接口还应注意选择有配合尺寸的法兰盘（方形、圆形两种）、止口。正确选择机械接口可使整机性能得到保障，延长使用寿命。

（4）电气接口的选择

编码器电气指标有电源电压、响应频率、消耗电流、脉冲上升下降时间和输出形式等。这里主要谈输出形式的选择。

编码器输出形式分为电压输出、集电极开路输出、互补

输出和长线驱动器输出等。一般在传输距离较近、电气干扰少的场合，选择电压输出、集电极开路输出（电源电压5～30V）。传输距离相对较远或电气干扰较严重的场合下，应选择互补输出（电源电压12～30V）以及长线驱动器输出配对使用。驱动器种类不少，所以用户一定要确认自己接收器的型号，正确选择编码器的驱动器。一般情况下不能互换。

5.4 速度—角度复合型传感器

5.4.1 概述

用于无刷直流电动机中的开关式霍尔传感器和光电式位置传感器，只能作为识别定、转子之间相互位置传感器，而不能传感速度，也不能作为精确的角度位置传感器。用于永磁交流伺服电动机中的旋转变压器或者光电编码器，虽然性能很好，但是价格很高。尤其是在要求严格的使用条件下，价格更高。随着机电伺服技术发展的需要，一种新型的基于电磁感应原理的速度—角度复合型传感器应运而生，它是能起到测速和测角两重作用的元件。速度—角度复合型传感器具有下列诸多优点，在无刷直流电动机和永磁交流伺服电动机中得到很好应用，并逐渐得到推广。

1）无刷化。所有的电信号，不论输出还是输入，都是在定子上，因此不需要任何电的滑动接触。

2）同时输出速度信号和位置信号。由于原理、结构上的特点，速度信号和位置信号由同一套绕组产生。速度信号是由绕组在旋转中切割恒定磁场得到的；位置信号是由绕组在不同位置时感生的交变磁场的电动势得到的。

3）有足够的速度精度和位置精度。

4）信号处理电路简单，既可给出方波的每对极6个位置信号（每60°电角度为一个区段），又可给出三相正弦位置信号。

5）结构简单，抗恶劣环境能力强。

6）成本低，价格便宜。

5.4.2 结构

根据恒定磁场建立的方法不同，速度-角度复合型传感器可以分成两种：一种是采用永久磁铁建立起恒定磁场；另一种是在励磁绕组上除了施以交流电压建立交变磁场外，再施加一个稳定的直流电压以建立恒定磁场。图5.15-77给出了采用永久磁铁的速度—角度复合型传感器的结构示意图。

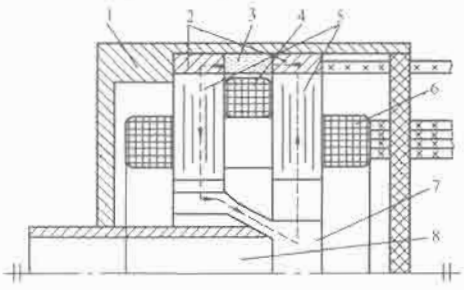


图5.15-77 速度—角度传感器的结构

1—机壳；2—久导磁体；3—永久磁铁；4—励磁绕组；5—定子铁心；6—三相输出绕组；7—转子磁极；8—转轴

机壳由非导磁金属材料做成。永久磁铁是环形的，充磁方向为轴向。外导磁体也是环形的，分为左右两个，中间放置永久磁铁。定子铁心也分为左右两个，两者呈对称的叠片型式。铁心的形状与一般的电枢铁心一样，具有均匀分布的槽，安放三相输出绕组。励磁绕组是环形的，安放在两半定子铁心中间。转子磁极由软磁材料做成。

5.4.3 工作原理和信号处理电路

（1）电压方程式

速度—角度复合传感器的气隙磁场由两部分组成：恒定分量和交变分量，其分布如图5.15-78所示。

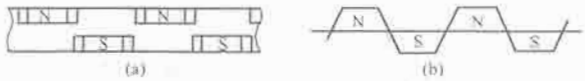


图5.15-78 气隙磁场分布

（a）磁极分布；（b）气隙磁通密度

其中，图5.15-78（a）表示转子磁极左右两侧的分布，上面两个磁极表示图5.15-77左侧的两个极，下面两个磁极表示图5.15-77右侧的两个极；图5.15-78（b）表示气隙中磁通密度沿圆周的分布，它应该是恒定磁场磁通和交变磁场磁通的合成。气隙磁场最大磁通密度可以用下式表示

$$B_{\delta m}=B_{\delta-m}+B_{\delta\sim m}\sin\omega t \tag{5.15-35}$$

式中，$B_{\delta-m}$为恒定磁场气隙最大磁通密度，由永久磁铁或励磁绕组上施加的直流电压产生；$B_{\delta\sim m}$为交变磁场气隙最大磁通密度，由励磁绕组施加的频率为f的交变电压产生。

施加的交变励磁电压为$u_1=U_{1m}\sin\omega t$（U_{1m}为电压的幅值）。由气隙磁场中交变分量$B_{\delta\sim m}\sin\omega t$产生的、和位置有关的三相变压器电动势

$$\left.\begin{aligned}e_{Ap}&=E_{pm}\sin\omega t\cos\theta\\ e_{Bp}&=E_{pm}\sin\omega t\cos(\theta-120^\circ)\\ e_{Cp}&=E_{pm}\sin\omega t\cos(\theta-240^\circ)\end{aligned}\right\} \tag{5.15-36}$$

式中，e_{Ap}、e_{Bp}、e_{Cp}为对应于A、B、C各相感生的变压器电动势；θ为定、转子之间相对转角（电角度），当A相绕组和励磁磁场轴线相一致时，θ为0°；E_{pm}为相电动势的最大值。

当转子处于转动状态时，除了上述的随着角度位置变化的变压器电动势外，三相绕组中还有切割磁力线产生的切割电动势。磁场中的所有磁力线都要被切割，因此切割电动势应该包括两个分量：一个分量是切割磁场中恒定分量所产生的；另一个分量是切割磁场中交变分量所产生的。三相绕组的切割电动势可以用下式表示

$$\left.\begin{aligned}e_{An}&=(E_v+E_{vm}\sin\omega t)\,nf(\theta)\\ e_{Bn}&=(E_v+E_{vm}\sin\omega t)\,nf(\theta-120^\circ)\\ e_{Cn}&=(E_v+E_{vm}\sin\omega t)\,nf(\theta-240^\circ)\end{aligned}\right\} \tag{5.15-37}$$

式中，e_{An}、e_{Bn}、e_{Cn}分别为A、B、C各相的总的切割电动势；E_v对应于恒定磁场的、速度为1000r/min时的切割电动势；E_{vm}对应于交变磁场的、速度为1000r/min时的切割电动势；n^*为比值，$n^*=n/$（1000r/min），其中n为即时转速；$f(\theta)$为一个固定形状的随θ周期变化的函数，其形状与气隙磁场波形有关，如图5.15-79(b)所示。$f(\theta-120^\circ)$、$f(\theta-240^\circ)$是分别滞后于$f(\theta)$ 120°和240°的形状一致的周期函数。

绕组中总的电动势应为

$$\left.\begin{aligned}e_A&=E_{pm}\sin\omega t\cos\theta+(E_v+E_{v\sim m}\sin\omega t)nf(\theta)\\ e_B&=E_{pm}\sin\omega t\cos(\theta-120^\circ)+(E_v+E_{v\sim m}\sin\omega t)\\ &\quad n^*f(\theta-120)\\ e_C&=E_{pm}\sin\omega t\cos(\theta-240^\circ)+(E_v+E_{v\sim m}\sin\omega t)\\ &\quad n^*f(\theta-240^\circ)\end{aligned}\right\} \tag{5.15-38}$$

分析绕组中总的电动势方程式，可知：

1）最大切割电动势产生的角位置比产生最大变压器电动势的角位置滞后 90°电角度。当绕组的轴线和磁极轴线一致时，绕组交链的磁通最多，但此时两条绕组边却在物理中心线上，所以此时切割电动势为零。当绕组转过 90°后，两边绕组边处在磁场磁通密度最大的位置上，因此切割电动势最大。

2）由于励磁电压的频率很高，励磁绕组的阻抗很大，因此励磁电流很小，所以气隙磁场中，交变分量的幅值很小。在一般的设计中，气隙磁通密度中交变分量的最大值与恒定分量之比 $B_{\delta\sim m}/B_{\delta-m}$ 都小于 1/100，甚至更小。因此切割电动势中对应于 $B_{\delta\sim m}$ 的分量 $E_{n\sim m}$ 与对应于 $B_{\delta-m}$ 的分量 E_{n-m} 相比也是很小的。

3）电机旋转切割的频率与励磁频率相比也很小。例如：转速 $n=6000$r/min，极对数 $p=2$ 时，切割频率 $f=2\times 6000/60=200$Hz。这和励磁电源频率 1～30kHz 相比也是很低的。因此，切割交变磁通产生的电动势对角度位置的函数关系的影响也是很小的。

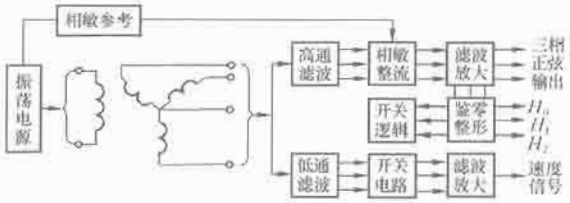


图 5.15-79　信号拾取电路原理框图

（2）信号拾取原理和处理电路

从绕组中总的电动势中角度位置信号和速度信号的表达式，可以看出，和角度位置有关的信号频率高，和速度有关的信号频率低，而且两者相差很远。这样就可以采用不同的电路结构把位置信号和速度信号分离开来：①采用高通滤波电路滤去低频的、仅和速度有关的切割恒定磁场的切割电动势，留下高频的交变的变压器电动势，然后对这个电动势进行相敏整流滤波，得到只含直流分量的和转角成函数关系的信号，三相信号彼此相差 120°电角度，对这三个信号进行过零放大、整形，可以得到三个彼此相差 120°电角度的方波信号；②采用低通滤波电路滤去高频的电动势信号，仅留下与恒定磁场有关的低频电动势信号，然后进一步处理，得到平直的可以反映出速度大小和方向的直流电平。

图 5.15-79 是信号拾取电路的原理框图。三相输出绕组既接到高通滤波电路，同时也接到低通滤波电路。两个电路的转折频率都可放在 3kHz 左右。这样的频率选择既滤掉了不需要的信号，又使有用信号基本上没有衰减。

角度位置信号的处理电路如图 5.15-80 所示。采用的相敏电路是全波相敏整流。由于一、二次侧的相位移很小，参考相位可直接取用励磁电压相位。相敏参考电压给出正、反相位各一个，分别控制两个电子开关。经过高通滤波之后的信号，经过两级反相放大，但第二级的增益为 1，仅起反相作用。两级的信号互为反相，并分别输出至各自的开关门。开关信号也互为反相，并使开关门分别在信号的正半周和负半周工作。这样在负半周工作时拾取的信号极性变为和正半周的一样了，形成了全波相敏整流。这个信号再经过滤波，滤去交流分量就变成随角度位置作正弦变化的信号了。经过鉴零放大电路，形成方波信号。

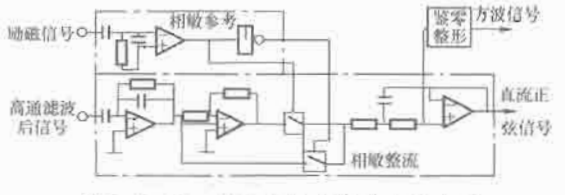


图 5.15-80　角度位置信号的处理电路

经过低通滤波电路之后，滤去了两个电动势：一个是和角度位置有关的变压器电动势；另一个是旋转切割交变磁场所产生的与速度信号中第二个分量 $E_{\delta m}\sin\omega t$ 有关的分量。仅留下了和恒定磁场有关的信号，这个信号仍是交流分量。虽然幅值的变化能够反映出速度的变化，但无法判别转向。因此，仍需要进一步处理，使这个信号变成直流型式，并且极性能够随着转动方向变化。

图 5.15-81 是速度信号处理电路。角度位置的三个彼此相差 120°电角度的方波信号，输入到逻辑门电路。输出六个门控信号，它们分别控制 6 个速度开关门 D1～D6。每三个门电路并在一起，并送至输出放大器中。正转时正半周的三个信号连至放大器正输入端，三个负半周信号连至放大器的负输入端，这样一个周期内信号变得一致。

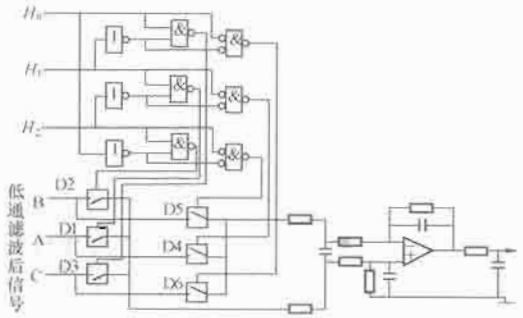


图 5.15-81　速度信号处理电路

5.4.4　特性和参数

速度—角度传感器既可传感速度信号，同时又可传感角度位置信号，因此兼有速度传感器和角度传感器两者的特点。这些信号不可能直接由传感器给出，而是必须分别经过各自的信号处理通道。

（1）角度位置传感信号

经过处理电路之后，给出的角度信号已不再是前面介绍的自整角机那样按励磁频率交变的三相信号，而是对称三相的、随转角作正弦变化的直流信号。

基本参数和一般的自整角机一样，主要有以下几个：

1）额定励磁电压。这是指加到励磁绕组上的励磁电压。但是一般来说，信号处理电路需要的是一组±电源，励磁电压是由信号处理电路产生的。所以励磁电压的大小和信号处理电路的外加±电源有关，一般为 3～8V。

2）额定频率。励磁频率为 15～30kHz 之间，这个频率比一般的自整角机要高得多，这是因为速度-角度传感器同时传感两种信号，频率高时，和切割频率相差大，两种信号的拾取方便，避免两者之间互相影响。另外，可以做到阻抗足够高，电流小，交变磁负荷小，励磁损耗减小。但是匝间电容耦合不容忽视，因此精度受到一定影响。

3）极对数。与相配的电动机的极对数一致，通常有 2、3、4 三种规格。

4）相数。通常是三相。

5）输出电压。经过信号处理电路的输出电压已是直流信号了。其最大输出电压也受到电路电源电压的限制，通常也为 3～8V。

6）电气误差。目前的电气误差为±15′～±60′。

7）零位误差。这点对于方波输出信号更为重要，一般

水平为±15′～±45′。

(2) 速度传感信号

速度传感器和普通的无刷直流测速发电机一样，其信号拾取方式也很相似。主要技术指标应该有灵敏度、线性精度、纹波系数、对称度和最大工作转速。

5.5 典型产品技术数据

国内研制的各种模块化转换器件，目前已批量生产，可替代国外同类产品，满足用户需要。

旋转编码器应用在自动化控制领域的各个行业，规格品种甚多，主要的生产厂家有美国 EPC、BEI 等几十家公司，年总产量数百万台。日本多摩川、沙木达克等几十家公司，年产量亦达百万台。年产量达到百万台的国家还有德国，德国有世界著名的 HEIDENHAIN 公司。此外，英国、法国、意大利、西班牙、韩国等都有专业生产编码器的公司，且具有相当规模。目前国内也有 30 多家企业生产各类旋转编码器，产品实用性强，基本能满足市场需求。下面仅列出部分单位的典型产品数据，见表 5.15-42～表 5.15-49。

表 5.15-42 ZSZ 系列自整角机/数字转换器

技术规格 / 型号	输出分辨率(位)	输出精度(′)	信号及参考电压频率(Hz)	信号电压(线电压)(V)	信号阻抗(kΩ)	参考电压(V)	参考阻抗(kΩ)	跟踪速度	工作温度(℃)	尺寸(mm×mm×mm)	重量(g)
12ZSZ749	12	±10	400	90	200	115	270	30r/s	0～70	80×67×12	90
12ZSZ741	12	±10	400	11.8	27	26	56	30r/s			
12ZSZ759	12	±12	50	90	200	115	270	5r/s			
12ZSZ755	12	±12	50	53	120	115	270	5r/s			
14ZSZ749	14	±5	400	90	200	115	270	12r/s			
14ZSZ741	14	±5	400	11.8	27	26	56	12r/s			
14ZSZ759	14	±6	50	90	200	115	270	500°/s			
14ZSZ755	14	±6	50	53	120	115	270	500°/s			

表 5.15-43 XSZ 系列正余弦旋转变压器/数字转换器

技术规格 / 型号	输出分辨率(位)	输出精度(′)	信号及参考电压频率(Hz)	信号电压(线电压)(V)	信号阻抗(kΩ)	参考电压(V)	参考阻抗(kΩ)	跟踪速度(r/m)	工作温度(℃)	尺寸(mm×mm×mm)	重量(g)
12XSZ741	12	±10	400	11.8	27	11.8 或 26	26 或 56	30	0～70	80×67×12	90
12XSZ742	12	±10		26	56	26	56	30			
12XSZ756	12	±10		60	130	115	270	30			
12XSZ7411	12	±10		115	270	115	270	30			
12XSZ741	14	±10		11.8	27	11.8 或 26	26 或 56	12			
12XSZ742	14	±10		26	56	26	56	12			
12XSZ746	14	±10		60	130	115	270	12			
12XSZ7411	14	±10		115	270	115	270	12			

表 5.15-44 XXSZ 系列线性旋转变压器/数字转换器

技术规格 / 型号	输出分辨率(位)	输出精度(′)	信号及参考电压频率(Hz)	信号输入电压(V)	信号输入阻抗(Ω)	参考输入电压(V)	参考输入阻抗(kΩ)	工作温度(℃)	尺寸(mm×mm×mm)	重量(g)
12XXSZ745	12	±10	400	53	≥80	115	500	0～70	140×200×25 插件板	400
12XXSZ742				26		60	250			
12XXSZ741				11.8		26	120			

表 5.15-45 SXZ 系列数字/旋转变压器转换器

技术规格 / 型号	输入分辨率(位)	输出精度(′)	参考输入电压(V)	输出电压(线电压)(V)	负载能力(VA)	矢径偏差(%)	工作温度(℃)	尺寸(mm×mm×mm)	重量(g)
12SXZ741	12	±8	115	11.8	1.3	±0.1	0～70	80×67×21	225
12SXZ742				26					
12SXZ743				36					
12SXZ746				60					

表 5.15-46　　SCQ 双速（粗、精）处理器

型号 / 技术规格	SCQ739			SCQ1039
速比	36∶1	18∶1	9∶1	
精输入	14 位并行自然二进制码			
粗输入	1～7 位并行二进制码	2～7 位并行二进制码	3～7 位并行二进制码	
组合输出	1～19 位	2～19 位	3～19 位	
精度	±1LSB			
转换时间（ns）	500			
电源	+5V　600mA			
工作温度（℃）	0～+70			-55～+105
尺寸（mm×mm×mm）	80×67×21			
重量（g）	100			

表 5.15-47　　国内转换模块系列产品与国外互换型号对照

序号	型号规格	国外互换型号	序号	型号规格	国外互换型号	序号	型号规格	国外互换型号
1	10ZS749	SDC1702512	26	16ZSZ755	SDC1721521	51	12SZZ749	DSC1706512
2	10ZSZ755	SDC1702512	27	16ZSZ759	SDC1721522	52	12SZZ749B	DSC192E500
3	10ZSZ759	SDC1702522	28	16ZSZ741	SDC1721511	53	12SZZ1041	DSC1706611
4	10ZSZ741	SDC1702511	29	16ZSZ1049	SDC1721612	54	12SZZ1049	DSC1706612
5	10ZSZ1049	SDC1702612	30	16ZSZ1055	SDC1721621	55	12SZZ1049B	D/S192E600
6	10ZSZ1055	SDC1702621	31	16ZSZ1059	SDC1721622	56	14SZZ741	DSC1705511
7	10ZSZ1059	SDC1702622	32	16ZSZ1041	SDC1721611	57	14SZZ749	DSC1705512
8	10ZSZ1041	SDC1702611	33	10XSZ741	RDC1702513	58	14SZZ749B	DSC544H-3
9	12ZSZ749	SDC1700512	34	10XSZ742	RDC1702514	59	14SZZ1041	DSC1705611
10	12ZSZ755	SDC1700521	35	10XSZ1041	RDC1702613	60	14SZZ1049	DSC1705612
11	12ZSZ759	SDC1700522	36	10XSZ1042	RDC1702614	61	14SZZ1049B	DSC544H-1
12	12ZSZ741	SDC1700511	37	12XSZ741	RDC1700513	62	12XSZ741	DRC1706513
13	12ZSZ1049	SDC1700612	38	12XSZ742	RDC1700514	63	12SXZ742	DRC1706514
14	12ZSZ1055	SDC1700621	39	10XSZ1041	RDC1700613	64	12SXZ1041	DRC1706613
15	12ZSZ1059	SDC1700622	40	10XSZ1042	RDC1700614	65	12SXZ1042	DRC1706614
16	12ZSZ1041	SDC1700611	41	14XSZ741	RDC1704513	66	14SXZ741	DRC1705513
17	14ZSZ749	SDC1704512	42	14XSZ742	RDC1704514	67	14SXZ742	DRC1705514
18	14ZSZ755	SDC1704521	43	14XSZ741	RDC1704613	68	14SXZ1041	DRC1705613
19	14ZSZ759	SDC1704522	44	14XSZ1042	RDC1704614	69	14SXZ1042	DRC1705614
20	14ZSZ741	SDC1704511	45	16XSZ741	RDC1721513	70	14SZZ1049B	DSC544H-1
21	14ZSZ1049	SDC1704612	46	16XSZ742	RDC1721514	71	ZGF1041	SPA1041
22	14ZSZ1055	SDC1704621	47	16XSZ1041	RDC1721613	72	SCQ739	TSL1612500
23	14ZSZ1059	SDC1704622	48	16XSZ1042	RDC1721614	73	SCQ1039	TSL1612600
24	14ZSZ1041	SDC1704611	49	12XXSZ741	RDC1700514			
25	16ZSZ749	SDC1721512	50	12SZZ741	DSC1706511			

表 5.15-48 YGM 型增量式光电编码器典型规格

型 号	YGM404	YGM506	YGM607、YGM610
外形尺寸（mm×mm）	φ40×42	φ58×44（48）	φ61×44（48）
轴伸（mm）	φ4×12	φ6×10	φ7×10、φ10×10（20）
重量（g）	≤250	≤300	≤300
输出脉冲数（p/r）	100，250，300，400，480，500，600，800，1000，1024，1270，2400，3600 或按要求	100，250，300，400，480，500，600，800，1000，1024，1270，2400，3600 或按要求	900，1000，1024，1200，1600，2000，2500，2540，3000，3600，5000，5400，5760，6000，8192，10800 或按要求
极限速度（r/min）	6000	12000	6000
输出信号	A、B 两相正交信号 一相 Z 标志信号	A（$\overline{A}$）、B（$\overline{B}$）正交信号、Z（$\overline{Z}$）标志信号	
频率响应（kHz）	0～100	0～160	0～160
允许轴负荷（N）	轴向 10，径向 20	轴向 10，径向 20	
工作温度（℃）	0～70 或－50～＋125，按要求		
储藏温度（℃）	－30～85 或－65～＋150，按要求		
相对湿度（%）	≤80		
振动（m/s²）	≤100		
冲击（m/s²）	≤1000		
电源电压（V）	5×（1±5%）		
电源电流（功耗）（mA）	≤205		
上升沿时间（μs）	≤0.1		
下降沿时间（μs）	≤0.1		
输出型式	TTL		
输出电流（mA）	≤20/相		

表 5.15-49 L 型增量式光电编码器典型规格

型 号	LEC	LBJ－001～007	LF	LMA
外形尺寸（mm）	φ66×50	φ38×40	φ66×100（法兰盘 φ212）	φ100×89（带法兰盘）
轴伸（mm）	φ5×15	φ6×12.5	φ15×28	
重量（g）	约 350	<100	约 900	约 450
输出脉冲数（p/r）	20、25、30、40、50、60、90、100、125、150、200、240、250、256、300、320、360、400、500、512、600、720、800、900、1000、1024、1200、1500、1600、1800、2000、2048、2500、3000、3600、5000	100、200、300、400、500、600、1000、1024、1200、1500、1800、2000、2048	同 LEC	同 LEC
极限速度（r/min）	5000	5000	6000	5000
输出波形	5000	2048	5000	5000
频率响应（kHz）	0～100	0～100	0～100	0～100
允许轴负荷（N）	轴向 10，径向 20	轴向 10，径向 20	轴向 50，径向 20	轴向 50，径向 20
工作温度（℃）	－10～＋60	－10～＋70	－10～＋60	－10～＋60
振动（m/s²）	19.6（10～200Hz）	49（10～200Hz）	19.6（10～200Hz）	49（10～200Hz）
冲击（m/s²）	980（6ms，2 次）	980（三方向 2 次）	980（6ms，2 次）	980（6ms，2 次）
电源电压（V）	5×（1±5%）	5 或 12、15	5×（1±5%） （纹波<1%）	5×（1±5%）
消耗电流（mA）	<200	<80（无负载）	<150	<200
响应时间（μs）	<1	<1	<1	<1
起动力矩（N·cm）	0.30（25℃）	0.15（25℃）	0.25（25℃）	0.30（25℃）
转动惯量（g·cm²）	30	4.7	120	35
输出阻抗（Ω）			250	250
输出型式	TTL 电平	TTL 或其他	TTL	TTL
输出信号	A、B、Z	A（$\overline{A}$）、B（$\overline{B}$）、Z（$\overline{Z}$）	A（$\overline{A}$）、B（$\overline{B}$）、Z（$\overline{Z}$）	A、B、Z
容许轴角加速度（rad/s²）	10^4	10^4	10^4	10^4

6　角位传感电机应用

6.1　选用

角位传感电机是伺服系统中的重要部件之一，它的作用是检测位移（角位移或线位移），相当于系统的眼睛（见图 5.15-82）。伺服系统的性能和控制精度在很大程度上取决于传感电机的分辨率和精度的高低。任何一个设计完善的闭环伺服系统，其定位精度或加工、测量精度主要由在系统中担当位置检测的角位传感电机决定，因此伺服系统中角位传感电机的选用至关重要。

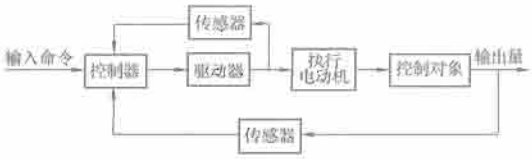


图 5.15-82　伺服控制系统原理框图

角位传感电机种类繁多，适用于各种不同的应用场合，许多系统中甚至使用多种、多台角位传感电机，所以应遵从前面各节介绍的各类角位传感电机的选用原则，综合考虑系统中角位传感电机的选用。如从系统中角位传感电机的功能来选定使用何种类型的产品；根据系统要求的精度水平选定产品类型，精度为分级的选用单对极自整角机和旋转变压器，精度为秒级的选用双通道自整角机和旋转变压器、感应同步器、光电编码器、磁性编码器等；选用高可靠性的无刷化产品；在体积和重量有着严格的限制的系统中选用将角位传感电机、速度传感电机、伺服电机、减速器等根据不同用途组成组件的组合产品；根据系统的环境条件选用适用的产品，冲击、振动要求高的场合适合无接触旋转变压器，避免使用光电编码器等。

6.2　应用领域

角位传感电机属于精密型控制电机，作为自动控制、遥控、遥测和自动监视系统中的检测、定位、数模转换元件，服务于各类自动化装置的定位，位置传感与指示、坐标变换与解算、角度编码等，在系统中起关键作用，广泛应用于导弹、火箭、人造卫星、宇宙飞船、舰船、飞机、自动火炮、雷达、战车等军事、现代化装备和精密控制机械的控制系统中。如火炮和雷达的自动定位，舰船方向舵的自动操纵，飞机的自动驾驶、遥远目标位置的显示、各种自动化装置的位置与速度检测和显示、坐标变换与解算等。

角位传感电机还广泛应用于数控机床，工业机器人，交、直流伺服电机，电梯，纺机，石化，冶金，矿山机械，印刷机械，办公自动化仪器仪表等行业。如在数控机床上做位置反馈和手动微调；与伺服电机配套作为执行机构；与丝杠配套使用应用于切纸机、材料试验机；电梯行业作为速度和位置的反馈环；在纺织行业，作为喷气织机、电脑绣花机的关键配件。

6.3　应用实例

6.3.1　轧钢机轧辊定位控制系统

图 5.15-83 是轧钢机轧辊的控制和指示系统。轧钢机通过粗轧机后，进入一排由两个垂直台和水平台组成的粗轧台，接着又是一排类似的精轧台。粗轧台和精轧台组成了钢梁一次通过的钢梁轧机。这套系统的作用是准确地调整轧钢的间隙并分别显示出来，并且快速地改变轧辊装置。每一轧台由一对水平或垂直配制的轧辊所组成，每一个轧辊可以通过螺杆来调节，螺杆又是通过齿轮啮合到一台驱动电动机上。这样轧辊之间的距离就为螺杆转角的函数。当改变轧辊位置时，轧台中的每一轧辊偏离中心线的距离均相等，以便使钢锭能沿着相同的通路行进。

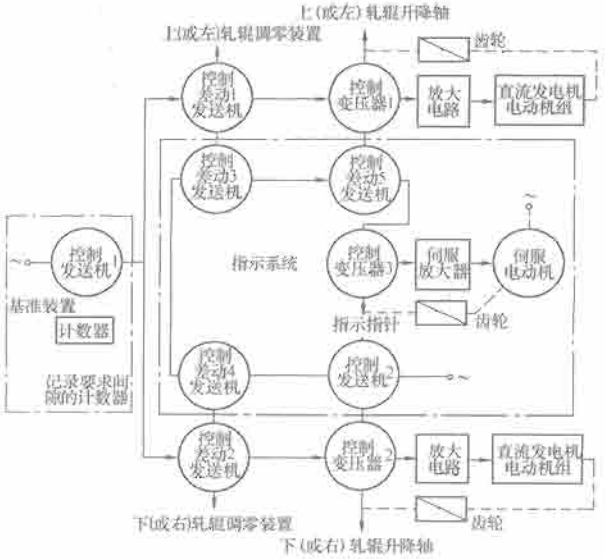


图 5.15-83　轧钢机轧辊的控制和指示系统

控制系统中有一个基准装置，它是一台控制式发送机，并在它的轴上装有一台计数器。发送机又分别通过两台控制式差动发送机再与两台自整角变压器相连。自整角变压器安装在控制每个轧台的上、下（或左、右）轧辊的螺杆装置里。差动发送机在系统中作为调零装置。当轧辊磨损以后，需要更换轧辊，新旧轧辊的直径可能不同。对于不同直径的轧辊，每台自整角变压器的电气零位就需要作相应的调整，这时只需调整差动发送机的转子位置即可方便地实现，而无需再改变计数器的数值，计数器上显示的数值即为轧辊之间的间隙。如果控制式发送机的转子位置和自整角变压器的转子位置不一致，则每一台自整角变压器将产生一个反映失调角大小的电压信号。此电压信号被放大后，最终操纵一套伺服电动机，并带动螺杆转动，达到改变轧辊位置的目的。

为了指示轧辊之间的距离，再将一台控制式发送机与控制一个轧辊的螺杆装置相连接，并将另一台差动发送机与控制另一个轧辊的螺杆装置相连接，通过自整角变压的输出电压就可以反映出它与这两台发送机转子的转角和呈正弦函数关系。由此输出电压即可测定一对轧辊之间的间隙或者用指针式仪表直接指示。

6.3.2　导弹发射架电液伺服系统

如图 5.15-84 所示，导弹发射架应跟踪发射制导雷达伺服系统，控制式发送机的信号与导弹发射架的信号进行比较而输至控制式变压器，其输出误差电压经解调、滤波、放大、校正及补偿后，输至伺服阀，控制伺服阀输出不同方向和大小的流量，进而控制液压筒以不同的方向和速度转动。

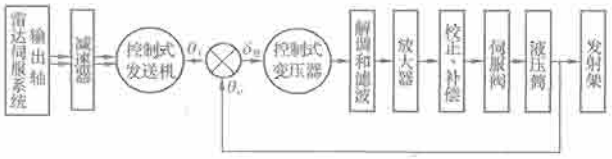


图 5.15-84　导弹发射架电液伺服系统

结果使发射架向着减小误差的方向转动，从而实现跟踪发射制导雷达伺服系统的目的。

6.3.3 雷达天线驱动系统

图 5.15-85 的雷达天线驱动系统是一个开环系统，力矩式发送机与接收机组成了角位远距离指示系统。控制式发送机、S/D 变换器、串并行输出接口电路组成了雷达的轴角编码系统。搜索跟踪雷达的椭圆形抛物面天线以恒速旋转，实现对飞行目标的探测、截获和跟踪，通过轴角编码系统的数据处理，提供目标信息给发射制导雷达。角位置远距离指示系统将雷达在探测及跟踪目标时的运转情况提供给指挥中心的接收装置。

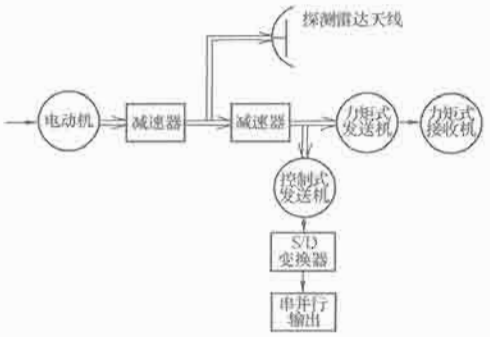


图 5.15-85 雷达天线驱动系统

6.3.4 发射制导雷达伺服系统

如图 5.15-86 所示，雷达控制台上的手轮经减速，带动控制式发送机转动角度 θ_i，若反馈信号为 θ_o，则控制式变压器输出一个与误差角 $\Delta\theta=\theta_i-\theta_o$ 成正弦函数关系，经解调、放大和校正后，控制伺服电动机带动天线向着减小误差角 $\Delta\theta$ 的方向转动，实现截获和跟踪目标的角度引导的目的。

图 5.15-87 与图 5.15-86 的功能相同，所不同的是把模拟量控制变为数字量控制，由控制式发送机、S/D 变换器及串并行输出接口电路等组成的轴角编码系统输出的数字脉冲经升速后的编码器的数字脉冲相比较后，输入至计算机进行运行补偿和校正，以提高系统的动态性能。经 D/A 变换转换成模拟量，放大后控制伺服电动机，再经减速以驱动天线。

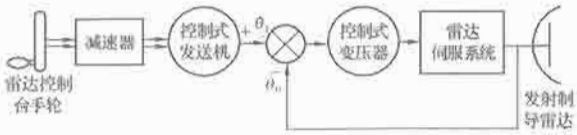


图 5.15-86 模拟发射制导雷达伺服系统

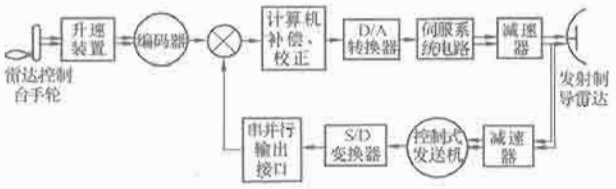


图 5.15-87 数字发射制导雷达伺服系统

6.3.5 旋转变压器在解算装置中的应用

旋转变压器在解算装置中应用较多。如矢量求解与坐标变换、反三角函数运算、四则运算、函数的微积分运算等。以乘法运算为例加以说明，图 5.15-88 为用线性旋转变压器和比例式旋转变压器进行乘法运算的框图。若有两个量均以转角形式给出，欲用电气方法求积时，可用线性旋转变压器和比例式旋转变压器来完成。图中线性旋转变压器 XX1、XX2、XX3 和比例式旋转变压器 XL 的电压比均设为 K_u。第一台线性旋转变压器外施电压 U_f 励磁，转子转角为 x_1，则其输出电压为 $K_uU_fx_1$，并此电压作为第二台线性旋转变压器的励磁电压，而其转子转角为 x_2，则其输出电压就为 $K_u^2U_fx_1x_2$。

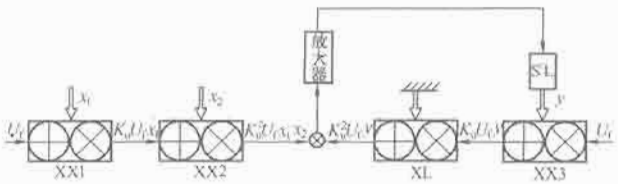


图 5.15-88 用线性旋转变压器进行乘法运算的框图

第三台线性变压器也加同样的电压 U_f 励磁，若它的转角为 y，则其输出电压为 K_uU_fy，并将此电压作为比例式旋转变压器的励磁电压，在其基准电气零位处将转子通过锁紧装置固定，这时比例式旋转变压器的余弦相输出电压应为 $K_u^2U_fy$。

将第二台线性旋转变压器的输出电压和比例式旋转变压器的输出电压合成后，加到由旋大器和交流伺服电动机组成的自动平衡系统中。当伺服电动机停转时应有

$$K_u^2U_fx_1x_2=K_u^2U_fy$$

则

$$y=x_1x_2 \tag{5.15-39}$$

6.3.6 由 XF、XC、XB 构成的角度数据传输系统

由 XF、XC、XB 构成的角度数据传输系统（见图 5.15-89）与由 ZKF、ZKC、ZKB 组成的自整角机角度数据传输系统具有相同的功用。设 XF、XC、XB 的电压比均为 1，当 XF 的转子绕组 R1R3 以电压 U_{R1} 励磁，R2R4 短接，转子转过 θ_1 时，则定子两相绕组 S1S3、S2S4 的输出电压 U_{S1}、U_{S2} 为

$$\left.\begin{aligned}U_{S1}&=U_{R1}\cos\theta_1\\U_{S2}&=U_{R1}\sin\theta_1\end{aligned}\right\} \tag{5.15-40}$$

将 U_{S1}、U_{S2} 分别作为 XC 的定子绕组 S1S3、S2S4 的励磁电压，并将 XC 的转子转过 θ_2 角度，则其转子绕组 R1R3、R2R4 的输出电压为

$$\left.\begin{aligned}U'_{R1}&=U_{R1}\cos(\theta_1-\theta_2)\\U'_{R2}&=U_{R1}\sin(\theta_1-\theta_2)\end{aligned}\right\} \tag{5.15-41}$$

再将 U'_{R1}、U'_{R2} 分别作为 XB 的定子绕组 S1S3、S2S4 的励磁电压，若 XB 的转子转角为 θ_3，则 XB 的转子绕组的输出电压为 $U_{R2}=U_{R1}\cos(\theta_1-\theta_2-\theta_3)$。若 $\theta_3\neq\theta_1-\theta_2$，则 $U_{R2}\neq0$，此电压经放大器放大后输入伺服是动机的控制绕组，则伺服电动机的转子立即转动，并通过减速器带动 XB 的转子，直至 XB 转子转过的角度 $\theta_3\neq\theta_1-\theta_2$ 时，$U_{R2}=0$，伺服机停止转动，此时即为差动传输的角度。

6.3.7 在位置读数系统中的应用

图 5.15-90 是感应移相器在位置读数系统中的应用原理图，在这个测角装置中感应移相器作为角度—相位转换器，对相位进行测量。这里感应移相器的作用是将机械转角 α 变换成输入电压和输出电压的相位差 $\Delta\phi$，输入电压和输出电

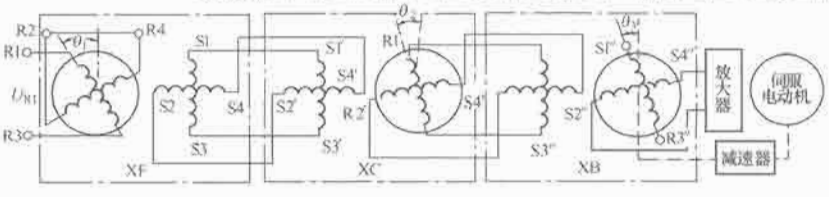


图 5.15-89 由 XF、XC、XB 构成的角度数据传输系统

压分别经过限幅放大、整形后送入检相装置，检相装置输出一个宽度为 Δt 的脉冲，该 Δt 正比于相位差 $\Delta\phi$，经过控制门使脉冲在 Δt 时间内被来自石英振荡器的高频脉冲填满。另一方面石英晶体振荡器的输出经分频器和触发器输出一个宽度为标准时间的脉冲去控制一个门，这样送到计数器的信号，就是一个标准时间内总的脉冲数。因为脉冲总数正比于 Δt，而 Δt 又正比于 $\Delta\phi$，$\Delta\phi$ 又正比于被测转角 α，所以计数器所表示的脉冲数标志着被测转角的大小。

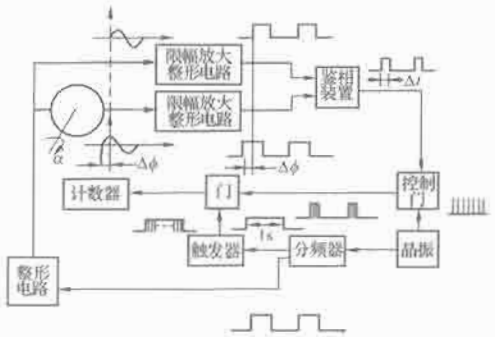


图 5.15-90　感应移相器位置读数系统原理框图

6.3.8　在数控机床等定位系统中的应用

图 5.15-91 是数控机床进给系统的应用框图。宽调速电动机、测速发电机、工作台的丝杆同轴连接在一起，感应移相器经 $1:n$ 的齿轮与电动机等连接在一起。工作时，由操作者发出指令，经数字相位转换器变换成为相应的相位 ϕ，此基准信号与感应移相器输出信号同时输入相位比较器中进行比较，感应移相器转子未转动时，其输出电压的相位不变，比较器的两端输入就有相位差，因而就有输出电压。经放大器放大后，控制宽调速电动机，感应移相器转子随电动机一起转动，其相位随之改变，比较器两路输入中的相位差就减少，直到感应移相器转过的角度使得它的输出电压的相位 ϕ' 与数字相位转换器输出的相位 ϕ 相等时，电动机停止转动，这是定位工作方式。若不断地维持数字相位转换器的输出相位 ϕ 与感应移相器输出电压相位 ϕ' 有一个符合要求的相位差，此时宽调速电动机就带动感应移相器匀速旋转，这是连续进刀工作方式。测速发电机的输出电压供给放大器，作负反馈，使系统减少振荡，工作稳定。显示器用来显示感应移相器实际转过的角度，即显示工作台的位置。齿轮升速比随不同丝杆螺距以及所需要的进给量的不同而变化。这种场合使用的移相器都是不产生动态相位误差的两相感应移相器。

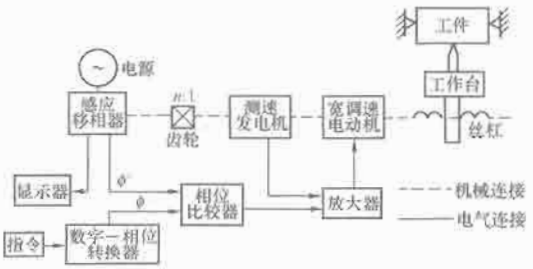


图 5.15-91　数控机床进给系统的应用框图

6.3.9　雷达脉冲测距系统

雷达脉冲测距系统的原理是由发射机发出的探测脉冲遇到目标后形成反射状，再由雷达接收机接收之。雷达发射的探测脉冲经目标反射后再返回雷达接收机成为反射脉冲，这个过程所需的时间可以从雷达显示管上确定，如图 5.15-92(a) 所示。由此可计算出雷达与目标之间的距离 $S=ct/2=1.5\times10^8/f$（c 为波速，3×10^8m/s；f 为正弦扫描电压的频率）。

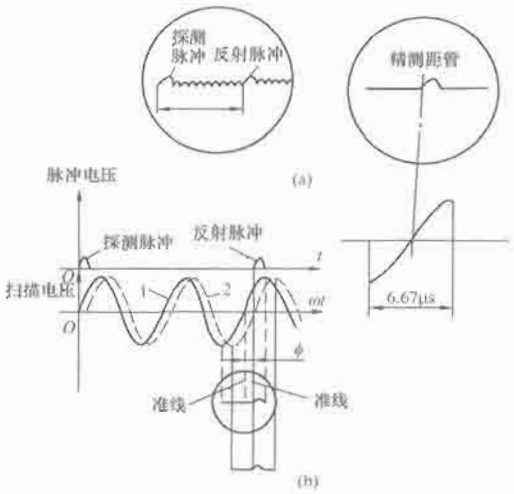


图 5.15-92　雷达脉冲测距系统

(a) 探测脉冲和反射脉冲；(b) 用正弦扫描电压测量距离

为了能精确地测定雷达与目标之间的距离，通常采用粗测距管和精测距管组成的顺序测距法。先通过粗测管测定距离的公里数，再由精测距管测定其余的米数，这种方法的量测精度可达几十米。精测距管的水平极板上加有一定频率的正弦电压进行扫描。若雷达接收机接收到反射脉冲时恰好是在正弦扫描电压的零值，此时在精测距管上反射波的光点就位于中心位置处，即位于准线上。通常是，当正弦扫描电压的相位角为 ϕ 时才接收到反射脉冲，这样反射波的光点就出现在精测距管线的一侧，如图 5.15-92 所示。为了精确地测量目标的距离，总是设法将反射波的光点移到准线位置处，即必须将正弦扫描电压的相位角移过 ϕ，使移相后的正弦扫描电压为零时，正好出现在反射波光点。根据正弦扫描电压所移过相位角的大小就可以确定所对应的距离为

$$S_j=\frac{\phi}{2\pi}T\frac{c}{2}=\frac{c\phi}{4\pi f} \tag{5.15-42}$$

正弦扫描电压的移相是通过感应移相器来完成的，它和雷达的距离操纵盘同轴。雷达观测员在测距时，转动距离操纵盘，感应移相器也随之转动，并使正弦扫描电压产生相位移，从而使反射波的光点处于精测距管的准线位置，达到测距的目的。

精测距管是通过测量移相器所产生的相位移，确定扫描正弦电压在 1 个周期中的时差，从而计算出几十米的距离，而与正弦扫描电压周期成整数倍的时差 nT 相对应的整公里数的距离，可在粗测距管的操纵盘上直接读出，两者之和为目标的全部距离为

$$S=S_j+S_c=\frac{v\phi}{4\pi f}+\frac{vn}{2f} \tag{5.15-43}$$

6.3.10　双通道同步随动系统

双通道同步随动系统起源于机械变速式双通道同步随动系统，采用电气减速方法来代替机械减速方法。运行中，由一对极电机组成的粗通道首先使得随动接收的一方处于同步位置附近，然后由多极电机组成的精通道进一步定位，使得系统准确地同步运行。这样就克服了由于多极电机的多个平衡点所造成的误差。在由感应同步器和磁阻式旋转变压器组成精通道的随动系统中，粗通道一般由一对极的旋转变压器组成。

图 5.15-93 是幅值控制双通道同步随动系统的原理框图。图中点画线框所示的部分，仅是在采用磁阻式旋转变压

器和感应同步器组成精通道时加入。因为其输出信号不足以推动接收方的励磁绕组。这个放大器是一个高保真的线性放大器，包括信号放大和功率放大。为了改善系统的稳定性，伺服电机同轴连接一个测速电机作为反馈元件。

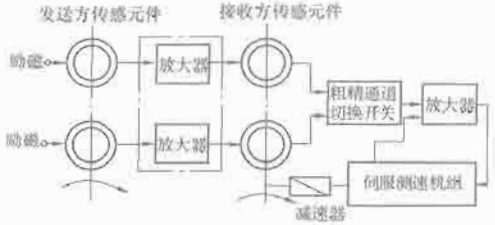


图 5.15-93 幅值控制双通道同步随动系统的原理框图

图 5.15-94 是相位控制双通道同步随动系统的原理框图。当发送机输入转角与接收机输出转角不等（即作为发送机与接收机的两个感应移相器输出相位不等）时，鉴相器输出误差信号，经放大后驱动伺服机并带动接收机主轴转至与发送机协调位置，系统处于同步状态。图中移相器是单相励磁、也可用两相正交励磁，副端单相输出一个幅值不变相位变化的信号。鉴相器中得到一个和发送机、接收机转角有关的信号电平，这个信号经过综合机构，然后放大控制伺服电机、驱动接收方移相器转至协调位置。

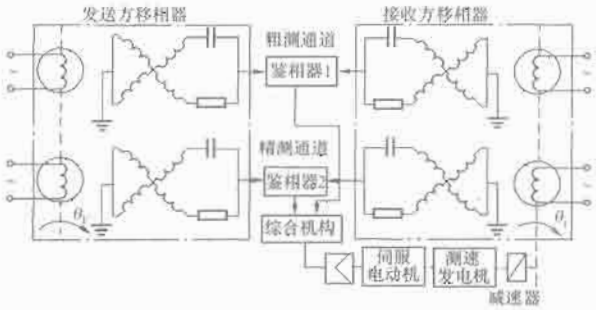


图 5.15-94 相位控制双通道同步随动系统的原理框图

6.3.11 数字伺服系统

这种系统一般由一台角位传感电机来完成系统的定位跟踪和读数，这种工作方式是将输入的轴角数字信号，经过数/模转换变成电的模拟信号，作为角位传感电机的励磁，然后由角位传感电机实现角度信号输出，通过执行电机实现跟踪。图 5.15-95 是幅值控制定位跟踪系统的原理框图，图 5.15-96 是相位控制定位跟踪系统的原理框图。这里

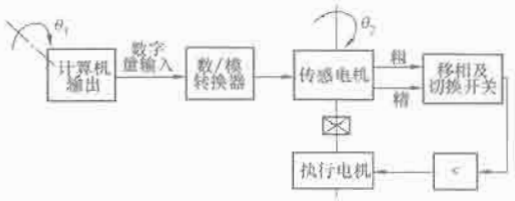


图 5.15-95 幅值控制定位跟踪系统的原理框图

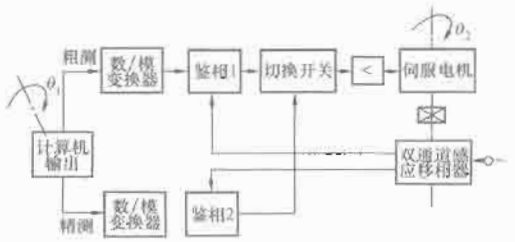


图 5.15-96 相位控制定位跟踪系统的原理框图

数字输出是代码的形式给定了轴角位置数据。模数转换电路除将数字信号变为电模拟信号外，还必须进行功率放大，这才能够给角位传感电机提供励磁。数字跟踪系统和随动系统的区别在于，前者是由计算机将被测对象的角度位置转变为数字量输入，而后者则由发送机将角度位置变为电模拟信号来完成指令。

6.3.12 在高精度、高速度角度-数字编码系统中的应用

高精度、高速度测角系统，在军事、天文、航天、导弹发射和机床定位等各个领域都有应用。图 5.15-97 是一个高精度、高速度角度-数字编码系统应用实例。该系统采用方波正、余弦励磁，误差信号输出的增量编码器，是用两位置跟踪的恒角加速度系统。当有误差信号存在时，即送入高速跟踪系统进行加工，变成误差和角度跟踪信号，然后经交替发生其变换成数字量，一部分送至外部计数器读数，另一部分送至输入传感电机完成对输入角的跟踪。

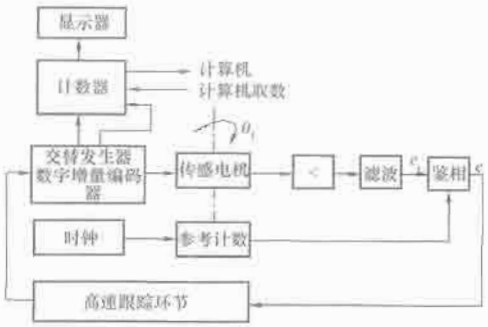


图 5.15-97 高精度、高速度角度-数字编码系统

6.3.13 直流电动机的位置伺服系统

图 5.15-98 是典型的直流三环位置伺服系统的原理框图。这是一种模拟-数字混合式伺服系统，电流环和速度环是模拟式的，位置环是数字式的。模拟式的电流环和速度环是系统有好的快速响应，数字式的位置环保证位置控制的高精度。位置反馈信号由光电编码器或自整角机、旋转变压器、感应同步器等检测，经转换电路处理变成数字式位置反馈信号。位置指令信号与位置反馈信号在微处理机中进行比较，得到系统的位置跟踪误差。微处理机采用多种灵活的控制算法进行计算调节，得到数字式的速度给定信号，经D/A转换变成模拟量送给速度环。位置环保证系统对位置指令信号的快速跟踪，实现系统的无振荡、无超调的精确定位。位置调节器通常采用 PID 串联校正和输入位置信号前馈的并联校正相结合的复合控制。直流伺服电动机的位置伺服系统还可以采用其他型式的闭环结构，如只有位置环、速度环而无电流环或只有位置环、电流环而无速度环或仅有一个位置环的结构等，每种闭环结构均有各自的控制特点和应用场合。

6.3.14 永磁交流伺服电动机的数字伺服系统

永磁交流伺服系统由永磁交流伺服电动机和伺服驱动器两大部分组成，它综合了伺服电动机、角速度和角位置传感电机技术的最新成就，随着电力电子器件向大功率、高频化、集成化和智能化方向发展，交流永磁伺服控制技术取得了长足的进步，将逐步替代传统直流伺服系统。

图 5.15-99 是数字化同步型永磁交流伺服电动机位置伺服系统的原理框图。与直流伺服系统相似，该交流伺服系统也是由电流环、速度环和位置环组成的三环闭环伺服系统，只是电流环和速度环也是数字式的。永磁交流伺服电动机运转必须要有转子位置传感器，它提供转子相对于定子的瞬时角位置信息。其信号进入伺服驱动器的电流环部分，实现对

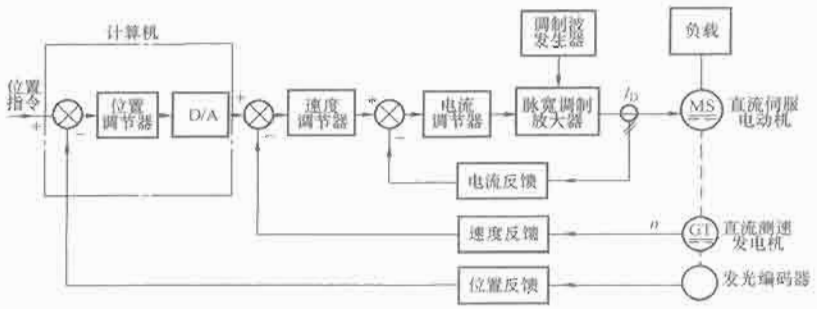


图 5.15-98　直流三环位置伺服系统原理框图

各相电流的“换相”或对相电流波形的控制。速度环和位置环都需要有速度（转速）传感器和位置传感器提供被控系统运动的速度和位移信息。转子位置传感器、速度传感器和位置传感器通常都安装在电动机轴上或经一定速比的机械传动副安装于电动机轴上。由于伺服控制方案的不同，选用不同工作原理和结构的传感器，有的只作为一种信号传感器使用，有的则兼作几种信号传感器提供综合反馈信号。下面以正弦波驱动方式的伺服系统为例来说明永磁交流伺服电动系统中使用的角位传感器。

转子位置传感器常采用无接触旋转变压器、绝对式光电编码器、增量式光电编码器或增量式磁性编码器，旋转变压器和绝对式光电编码器可作多种检测功能应用，既可检测系统位置和转子速度，又可检测转子磁极位置。随所用转子位置传感器的不同，单位正弦波电流的产生模式的不同。由无接触旋转变压器或绝对式光电编码器产生单位正弦波原理框图如图 5.15-100 所示，旋转变压器输出的模拟量位置信号经旋转变压器数字转换器 R/D 转变成数字量，绝对式光电编码器则直接输出转子绝对位置的数字量。在 EPROM 中查 $\sin\theta$、$\sin(\theta-2\pi/3)$、$\sin(\theta+2\pi/3)$ 表，可得到三相单位正弦波的数字量输出；由增量式光电编码器或磁性编码器产生单位正弦波原理框图如图 5.15-101 所示，增量式光电编码器或磁性编码器输出两路正交 A、B 信号经备品变相电路变成正向脉冲和反向脉冲信号后，送至可逆计数器得到转子的增量位置，转子的绝对位置由电机每转一个的标志脉冲 Z 配合得到。电机起动时，在标志脉冲 Z 到来前，位置计数值不能直接反映转子的绝对位置，系统可运用“初始化程序”，先按矩形波驱动方式工作，一旦标志脉冲出现，即切换到正弦波驱动方式工作。

由转子位置传感器（旋转变压器）产生转子位置信息经 R/D 电路转换成 10 位、12 位、14 位或 16 位的数字量，位置值对时间的微分即为电动机的转速信号 n_1。用定时采样的方法从计算机计算出实际转速的数字量，与速度指令值 n_g 进行比较得出速度误差，对速度误差进行调节计算，得出数字式的电流指令幅值 I_m 送给电流环。数字式的速度调节器通常采用 PI 调节或大误差时积分分离的 PI 调节。

数字式的位置环的结构与直流伺服系统的位置环相同。速度环和位置环的数字调节由同一个微处理机完成，通过改变软件程序实现灵活的控制。位置控制的高精度是通过高分辨率的转子位置传感器得到的。全数字化的关键是实现高品质的正弦波电流跟踪，提供快速的电流控制。数字化的电流调节器需要尽可能小的采样周期，具有高速控制处理能力的数字信号处理机的速度比一般微机高一个数量级，能较好地满足电流环的要求。全数字化的控制简化了控制电路，提高了系统的稳定性和可靠性，增强了对外界环境的适应能力，采用微处理机或数字信号处理机实现的数字控制，通过改变控制结构和控制算法以灵活地实现多种高性能的控制。

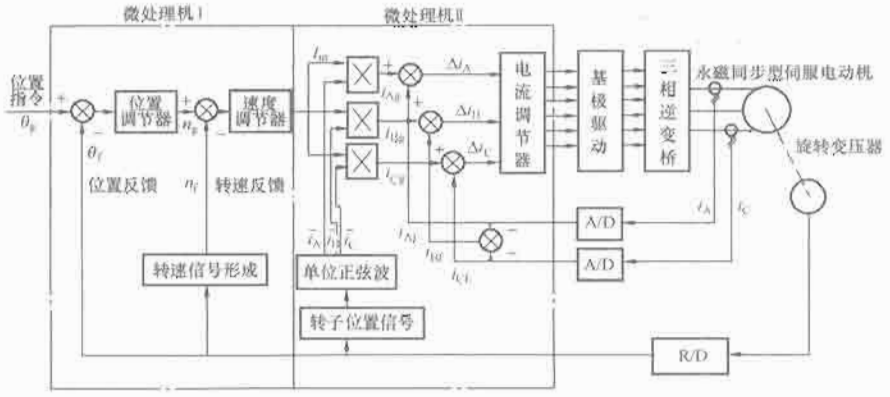


图 5.15-99　数字化同步型永磁交流伺服电动机位置伺服系统原理框图

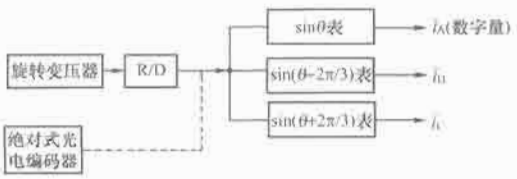


图 5.15-100　转子绝对位置检测产生单位正弦波原理框图

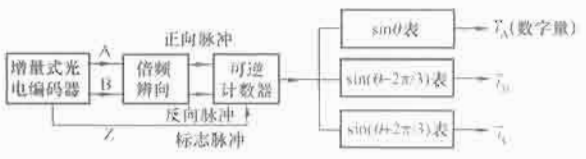


图 5.15-101　转子增量位置检测产生单位正弦波原理框图

6.3.15 S/D转换器的典型应用

1) S/D转换器在数字闭环控制中的应用。图5.15-102为S/D转换器在数字控制反馈环路中应用的原理框图，要求SDC1700系列转换器有很高的动态性能。值得注意的是，SDC1700系列转换器取代了常规的测速发电机、相敏解调器，同时提供了数字位置反馈信号。

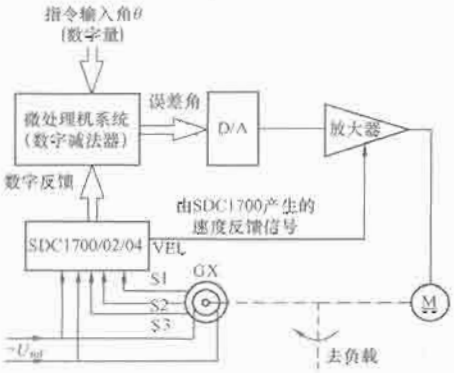


图5.15-102 S/D转换器在数字控制反馈环路中的应用原理框图

2) S/D转换器在双通道同步跟踪系统中的应用。图5.15-103为S/D转换器用于精读数、粗读数双通道同步处理系统的基本电路。两片跟踪型S/D转换器模块为精、粗(双速)数据处理系统提供信息。图中，TSL1612是双速自整角机/数字转换器，它以数字形式解决将双速自整角机对的多速输出组合为单速数字输出的问题。TSL1612用简单的输入/输出程序为非二进制速比(36∶1或18∶1，9∶1)提供双速逻辑(自动地实现精、粗假零纠错)，它接受SDC1704精通道转换器的14位和SDC1702粗通道转换器的7位二进制角量输入，把它们逻辑组合、处理，输出一个高达19位的并行二进制数码来表示"粗"轴的角度θ，而转换

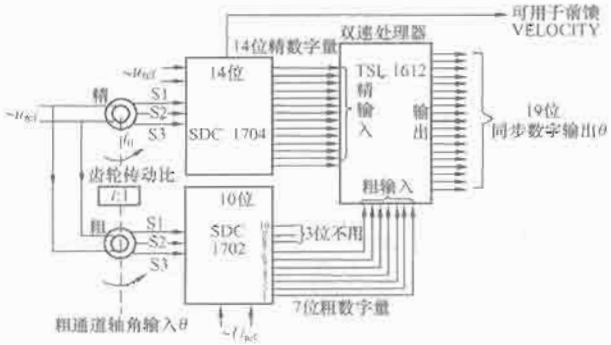


图5.15-103 粗/精同步信息处理系统的基本电路

时间仅500ns，为高精度同步跟踪伺服系统实现计算机数字控制提供方便。

6.3.16 IR/D转换器的典型应用

IR/D转换器(Inductosyn/Resolwer to Digital Converter)是一种感应同步器/旋转变压器-数字转换器，这里介绍在工业控制、机床和机器人控制中广泛应用的12位IRDC1730。在位移和角度测量的感应同步器/旋转变压器系统中，其跟踪速率可达(170节距/s)/(170r/s)。对于感应同步器系统，它产生的数字输出能分辨法兰德(Farrand)线性感应同步器定子单个节距内的中间距离。此外，IRDC1730也附有比例输入角速度(或线速度)的直流电压信号，可用于反馈(或前馈)；同时，它提供方向信号，以确定被检测物体的初始位置和终点位置。

1) IRDC1730与旋转变压器组合在机床控制中的应用。目前，许多机床控制系统中用旋转变压器来测量直线位移，图5.15-104所示为IRDC1730与旋转变压器组合，利用外接计数器对丝杠的转数进行计数，以给出用机械轴位置的绝对数字表示的一种典型应用原理。

需注意的是，这种方法不同于通常测量旋转变压器相位来实现数字转换的技术(旋转变压器相位检测数字转换技术要求给旋转变压器提供很高精度的正、余弦波形)，而只要求旋转变压器转子励磁，定子输出的正、余弦信号连接到IRDC1730。这种方法的优点在于利用相对值(比率)测量控制原理，因而对施加到旋转变压器转子上的励磁(参考)电压及其频率的稳定度要求不太高，在旋转变压器和转换器之间产生很小的电压降或者在信号线上产生很小的感应噪声时，也不会影响测量精度。

在图5.15-104中"SET DATUM"("置基准起点")微动开关与相应的电路配合，用来使工作台移动至丝杠的末端时计数器清零。只要在一个螺距之内微动开关可以动作，则基准起点可以用电的方法来实现。

2) IRDC1730与感应同步器组合在高精度机床闭环控制中的应用。由IRDC1730与感应同步器组合，可以构成高精度的直线(或旋转)测量系统。如果感应同步器的节距为2mm，则可获得优于0.5μm的分辨率。图5.15-105所示为IRDC1730与直线感应同步器构成的机床控制环路原理图，它类似于旋转变压器的应用。用一个固定的恒流源经功率运算放大器对感应同步器的定尺激励，并经90°移相电路作为IRDC1730的励磁(参考)输入。滑尺输出的正、余弦信号经增益调整分别施加到IRDC1730的SIN和COS端。IRDC1730的数字输出送至微处理机，经D/A转换、功率放大，推动直流伺服电动机，构成位置闭环控制。IRDC1730的VEL输出可提供系统速度阻尼。

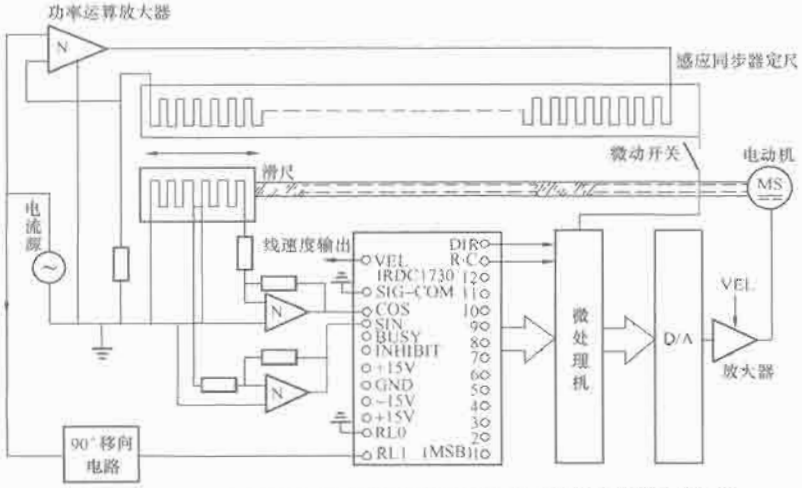


图5.15-104 用IRC1730与旋转变压器组合测量机床绝对位移

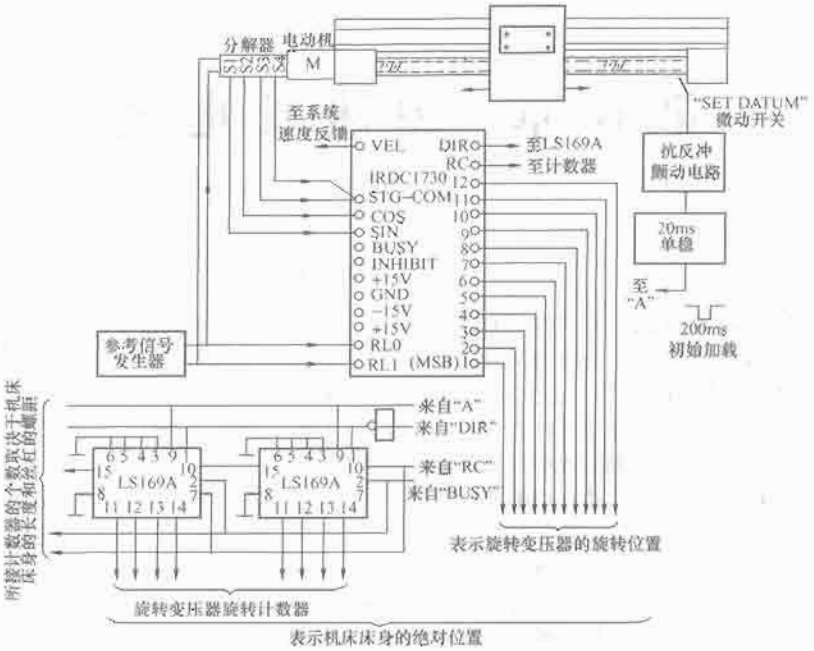


图 5.15-105　由直线感应同步器和 IRD 转换器构成的机床控制环路原理图

第16章 测速发电机

1 概述

测速发电机是一种速度信号检测元件。它将输入的运动速度转换成电信号输出。其输出的电信号（电压的幅值或频率）与输入的运动速度（旋转运动的转速或直线运动的线速度）呈线性函数关系。它是伺服系统中的基础元件之一，广泛用于各种速度控制系统中。如在自动控制系统中通过其输出电信号的变化来反映系统速度的变化，以达到检测或自动调节速度的目的；或用作阻尼元件，利用它产生的反馈信号，以提高系统的跟踪稳定性和精度；在解算装置中用作微分和积分元件，也可作为加速或延迟信号之用。此外，在一些场合中，它还被直接用作速度计，用来测量各种运动机械在转动、摆动或直线运动时的速度。

2 分类、特点和技术标准

2.1 分类与特点

测速发电机按其工作原理可分为直流测速发电机和交流测速发电机两大类，按其励磁方式可分为电磁式和永磁式。

直流测速发电机由直流电源励磁或者由永磁体励磁，输出电压为直流。根据其所适用的速度范围又可分为一般转速永磁直流测速发电机和低速永磁直流测速发电机，按有无电刷和换向器可分为有刷直流测速发电机和无刷直流测速发电机。

交流测速发电机是由交流电源励磁或者也由永磁体励磁，输出电信号是随时间交变的。交流测速发电机可分为同步测速发电机和异步测速发电机两大类。同步测速发电机又可分为永磁式、感应子式和脉冲式三种。异步测速发电机又有笼型转子异步测速发电机和空心杯转子异步测速发电机两种。

按测速发电机是输出电压幅值还是脉冲信号来分，可分为鉴幅型和鉴频型，或者称为模拟型或数字型。数字型测速发电机是随着数字伺服系统的发展需要而设计的，也称为脉冲信号发生器。

测速发电机按电机运动部分的运动方式来分，可以分为旋转型、有限转角型和直线型。旋转型测速发电机的运动部分称为转子，它在测速发电机的定子内腔中围绕其自身的旋转中心作旋转运动。此类测速发电机输出电信号的幅值或频率与转子角速度成正比。有限转角型测速发电机转子在一定角度范围内作往复运动，其输出电压幅值在需要的转角范围内与角速度呈线性关系，具有矩形输出特性。直线型测速发电机的运动部分称为“动子”，它在测速发电机的“定子”内腔作往复直线运动。直线型测速发电机输出电信号的幅值与“动子”直线运动的速度成正比。

随着电子元器件及控制技术的不断发展，测速原理及元器件也在不断更新。各类旋转变压器、编码器及其他速度传感器等作为新型的测速元件而越来越多地应用于自动控制系统中。本章主要介绍常用测速发电机的结构、原理与特性。

2.2 技术标准

测速发电机相关技术标准如下：

GB/T 13633—1992 《永磁式直流测速发电机 通用技术条件》

GB/T 4997—1993 《永磁低速直流测速发电机通用技术条件》

GJB 1457—2004 《永磁直流测速发电机通用规范》

GJB 2554—1995 《无刷直流测速发电机通用规范》

JB/T 2661—1999 《ZCF 系列直流测速发电机 技术条件》

GJB 777A—1997 《交流测速发电机通用规范》

GJB 777/1—2000 《J36CK 系列交流测速发电机规范》

JB/T 8160—1995（GBn58—1978）《CK 系列空心转子异步测速发电机》

JB/T 6761—1993 《脉冲测速发电机通用技术条件》

3 直流测速发电机

直流测速发电机的应用已相当广泛，目前电磁式直流测速发电机已逐渐被永磁式所替代。因此，本节主要介绍永磁直流测速发电机。

永磁直流测速发电机具有输出斜率高、线性误差小、无零速输出电压、无相位误差及不受负载性质（电阻、电容、电感负载）影响等特点，在系统中作检测、校正、阻尼和解算元件。有刷直流测速发电机由于电刷与换向器间存在滑动接触，因此存在一些固有缺点，如可靠性较差、有无线电干扰、输出电压有纹波、低速时存在不灵敏区、高速时输出特性向下弯曲等，但这些不足之处可采取一些弥补措施。

3.1 基本原理和结构

永磁直流测速发电机的工作原理和结构与一般小型直流发电机的相似，其电气原理图如图 5.16-1 所示。不同的是测速发电机不以对外输出功率为主要指标，因此其输出功率比较小。

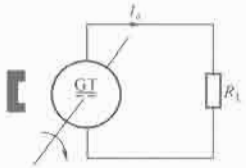


图 5.16-1 永磁直流测速发电机电气原理图

位于测速发电机定子上的永磁体被充磁后在测速发电机气隙中建立了一个恒定磁场，当电枢被原动机驱动旋转时，位于电枢槽中的导体便切割气隙磁通，产生感应电动势，在不同磁极下，导体感应电动势的方向是不同的，通过电刷及换向器的换向作用，就可获得方向始终不变的直流电动势。

3.2 输出特性

由直流测速发电机电刷两端引出的电动势为

$$E_a = \frac{pN\Phi}{60a}n = K_e n$$

式中，p 为极对数；N 为电枢绕组总导体数；Φ 为每极磁通；a 为电枢绕组并联支路数；n 为测速发电机转速；K_e 为反电动势常数。

当直流测速发电机空载时，电枢电流 $I_a=0$，输出电压与感应电动势相等，即

$$U_a = E_a = K_e n$$

由上式可知，直流测速发电机的输出电压 U_a 与电枢转速成严格的正比关系。此时测速发电机的输出电压就间接地表征了测速发电机的转速，也如实地反映了驱动测速发电机的旋转机械的转速，即具有“测速”的功能。

当接负载电阻 R_L 时，因为电枢电流 $I_a\neq0$，直流测速发电机的输出电压为

$$U_a = E_a - I_a R_a$$

式中，I_a 为电枢电流，即负载电流；R_a 为电枢回路总电阻。

R_a 包含电枢绕组电阻和电刷与换向器间的接触电阻，而接触电阻不是一个恒定值，它将随电刷和换向器本身的材质及两者之间的接触状况、电刷压力、火花、环境条件（温度、湿度、冲击、振动）等测速发电机的运行状态因素的改变而改变。显然，当测速发电机接负载后，输出电压将比空载时的小。

由于负载时电枢电流为 $I_a=U_a/R_L$，因此输出电压又可变换成以下形式

$$U_a = E_a - \frac{U_a}{R_L}R_a$$

经整理后为

$$U_a = \frac{E_a}{1+\frac{R_a}{R_L}} = \frac{K_e}{1+\frac{R_a}{R_L}}n = Cn$$

式中

$$C = \frac{K_e}{1+\frac{R_a}{R_L}}$$

C 为测速发电机输出特性的斜率。当不考虑电枢反应，且认为 Φ、R_a、R_L 都为常数，斜率 C 也是常数，则直流测速发电机的输出特性曲线为直线，如图 5.16-2 所示。

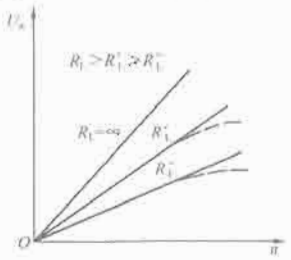


图 5.16-2　直流测速发电机的输出特性

从图中可以看出，对于不同的负载电阻 R_L，其输出特性的斜率也不同，并将随负载电阻的减小而降低。

在理想情况下，当 R_L、R_a、Φ 都不变时，其输出特性斜率在负载时将不会发生改变，如图 5.16-2 中的实线所示。但实际运行时，由于电枢反应和电刷接触压降的变化及温度变化等因素的影响，直流测速发电机的输出电压与转速间并不能严格保持正比关系，如图 5.16-2 中虚线所示。这种特性曲线向下弯曲的现象在负载电阻 R_L 较小或转速很高时特别显著。因为当负载电阻越小或转速越高时，电枢电流就越大，电枢反应的去磁作用越强，气隙磁通减小越多，输出电压下降越显著。

3.3　主要技术指标

1）输出斜率。在规定负载条件下，测速发电机在1000r/min时产生的输出电压，V/（kr/min）。

2）输出电压不对称度。测速发电机在相同转速下，正、反两方向旋转时，输出电压绝对值之差与两者平均值之比，用下式表示

$$\text{输出电压不对称度} = \frac{|U_1|-|U_2|}{\frac{1}{2}(|U_1|+|U_2|)}\times100\%$$

式中，U_1、U_2 分别为正、反方向测量的输出电压值。

3）线性误差。在规定的转速范围和负载条件下，实际输出电压与理想输出电压之差对该转速时理想输出电压之比。取全测量转速范围内线性误差绝对值中的最大值为测速发电机的线性误差值。

任意转速时的线性误差用下式表示

$$\text{线性误差} = \frac{U_k - n_k U_n}{n_k U_n}\times100\%$$

式中，n_k 为任意转速，kr/min；U_k 为 n_k 时的输出电压，V；U_n 为理想输出特性的斜率，V/（kr/min），即1000r/min时的加权平均电压

$$U_n = \frac{U_1+U_2+\cdots+U_n}{n_1+n_2+\cdots+n_n}$$

式中，n_1、n_2、…、n_n 分别为各测量点的转速；U_1、U_2、…、U_n 分别为对应 n_1、n_2、…、n_n 时的输出电压。

对于正、反转两个方向使用的直流测速发电机的线性误差应取正、反两个方向上的线性误差中的最大值来度量。

4）纹波系数。直流测速发电机的输出电压波形如图5.16-3所示。其输出电压由一个直流分量（平均值）以及叠加在其上的脉动分量（交变值）两部分构成，纹波系数是衡量输出电压脉动分量大小的参数。在规定转速和规定负载条件下，输出电压的交流分量的峰-峰值或有效值与直流分量之比称为纹波系数，用百分数表示。前者为峰-峰值纹波系数，后者为有效值纹波系数。

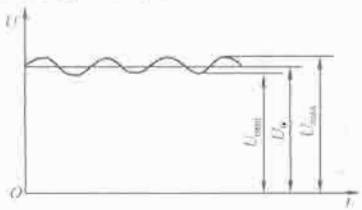


图 5.16-3　直流测速发电机输出电压波形

5）短时电压稳定度。输出斜率大于或等于50V/(kr/min)的直流测速发电机在恒定转速及规定负载条件下，在任何1h 1周期内输出电压最大峰-峰值与平均电压之比称为短时电压稳定度，用百分数表示。

6）长时电压稳定度。输出斜率大于或等于50V/(kr/min)的直流测速发电机在恒定转速及规定负载条件下，在几小时或几天内输出电压变化的最大值与平均电压之比称为长时电压稳定度，用百分数表示。

7）变温误差。在一定转速与规定负载条件下，由于环境温度变化而引起的输出电压变化称为变温误差，以每摄氏度电压变化率的百分数表示，其计算公式如下

$$\text{变温误差} = \frac{U_{t1}-U_{t2}}{U_{t2}(t_2-t_1)}\times100\%$$

式中，U_{t1} 为温度为 t_1 时的输出电压，V；U_{t2} 为温度为 t_2 时

的输出电压，V；t_1 为低温，℃；t_2 为高温，℃。

8）最大线性工作转速。在允许线性误差范围内的最高转速，r/min。

9）最小负载电阻。保证输出特性在误差范围内的最小负载电阻值，kΩ。

10）不灵敏区。由于换向器与电刷的接触压降而导致在零速附近的输出斜率显著下降的转速范围，不灵敏区如图 5.16-4 所示。

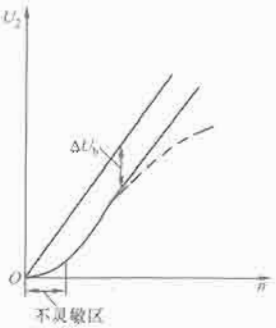


图 5.16-4 考虑电刷接触压降后直流测速发电机的输出特性

3.4 设计制造特点

永磁直流测速发电机设计重点在于提高输出斜率和输出特性的线性精度以及降低输出电压纹波系数。其设计制造特点主要体现在以下几个方面：

1）减小电枢绕组电阻，增加负载电阻，以提高测速发电机输出斜率及输出特性线性度。

2）选取较小的电负荷，并适当增大气隙或选取不均匀气隙，以降低电枢反应的影响，尽量使气隙磁通保持不变，以保持输出电压与转速的线性关系。

3）采用斜槽和尽可能多的奇数槽及虚槽数设计，电枢绕组型式尽量采用单波绕组，有利于降低纹波系数。

4）选取合适的电刷牌号来减小换向器与电刷间的接触电阻，以缩小不灵敏区。

5）制造过程中采取以下措施降低纹波系数：铁心叠装时采用错片叠装，以避免铁心导磁不均匀；提高加工精度及装配要求，以保证定转子同轴度及使电刷中心严格处于物理中性线上；提高换向器表面的表面光洁程度，以保证电刷与换向器间接触可靠等。

6）磁路设计和制造过程中应考虑磁的稳定性，必要时应进行稳磁处理。

3.5 温度补偿

温度的变化将会引起直流测速发电机输出特性的改变。对变温误差有要求的直流测速发电机，应考虑进行温度补偿。在设计上除考虑选用温度系数较小的导电和导磁材料外，最常用的补偿方法是采用磁分路补偿法，如图 5.16-5 所示。其原理是采用磁导率随温度升高近似线性减小的磁温度补偿合金材料对主磁通进行部分分流。随着温度升高，其所分流的磁通逐渐减少，在一定程度上补偿了由于温度升高导致的主磁通的下降，尽可能保持主磁通的恒定，达到温度变化后输出特性尽可能保持不变的目的。

3.6 试验

1）试验条件。直流测速发电机试验时，测试仪表、记录仪表和稳速驱动装置的误差应小于被测项目误差的 1/4。稳速驱动装置的稳速精度通常在（0.01～0.03）%或更高。电压表的内阻应远大于最小负载电阻。无特殊要求的，试验应在冷态条件下进行。

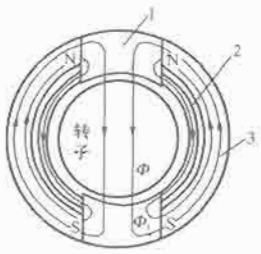


图 5.16-5 磁分路补偿原理图
1—磁轭；2—磁分路；3—永磁体

2）输出电压不对称度测量。按 GB/T 13633—1992 标准规定，输出电压不对称度测量一般在 1500r/min 时进行，若最高转速低于 1500r/min 时，则在最高转速下测量。

3）线性误差测量。按 GB/T 13633—1992 标准规定，线性误差测量时，一般在最大线性工作转速的 10%到最大线性工作转速间大致均匀地至少选择 5 个转速进行测量。

4）纹波系数测量。测量纹波因数时，一般在输出端增加一个 *RC* 滤波器，以滤除高频干扰杂波，通常电阻值选取为 15kΩ，电容值选取为 0.1μF，其接线图如图 5.16-6 所示。

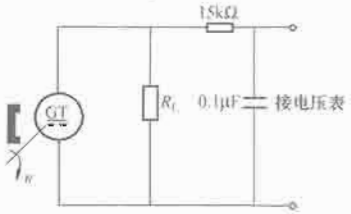


图 5.16-6 直流测速发电机纹波系数测量接线图

4 交流异步测速发电机

交流测速发电机分为同步测速发电机和异步测速发电机。由于同步测速发电机感应电动势的频率随转速变化，致使负载阻抗及测速发电机本身的阻抗均随转速而变化，所以只作指示元件用，在自动控制系统中较少采用，在此不作进一步介绍。

异步测速发电机有笼型转子和空心杯转子两种，它的结构和两相交流伺服电动机相似。笼型转子异步测速发电机输出斜率大，但线性误差及相位误差大，剩余电压高，一般只用在精度要求不高的控制系统中，本章也不做进一步介绍。

空心杯转子异步测速发电机按转子材料可分为非磁性空心杯转子和铁磁性空心杯转子两种。铁磁性空心杯异步测速发电机由于技术指标不高而不常用。本节仅介绍非磁性空心杯转子异步测速发电机。

相对于直流测速发电机而言，非磁性空心杯转子异步测速发电机具有结构简单、不存在无线电干扰、工作寿命长等优点。由于它的转子是一种薄壁杯形结构，惯量非常小，所以有很好的快速响应性，能够将轴上的速度信号快速转变为电信号输出，非常适用于小功率随动系统和解算装置，是目前自动控制系统中应用最为广泛的一种交流测速发电机。但该种测速发电机存在相位移及相位误差、零速输出电压（又称剩余电压）等缺陷。

4.1　基本原理和结构

空心杯转子异步测速发电机的典型结构如图 5.16-7 所示。它主要由外定子、内定子以及位于气隙中的空心杯转子组成，其工作原理图如图 5.16-8 所示。

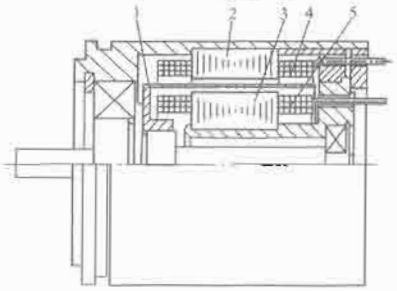


图 5.16-7　空心杯转子异步测速发电机结构图

1—空心杯转子；2—外定子；3—内定子；4—励磁绕组；5—输出绕组

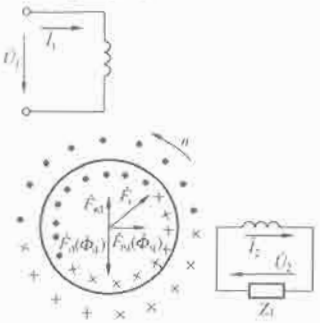


图 5.16-8　空心杯转子异步测速发电机工作原理图

空心杯转子异步测速发电机定子上放置有在空间上严格保持 90°电角度的两相绕组，即励磁绕组和输出绕组。小机座号（如 ϕ28mm 机座）以下测速发电机一般两相绕组均放置在外定子上。ϕ36mm 以上机座测速发电机通常把励磁绕组放置在外定子上，而将输出绕组放置在内定子上。转子杯则采用电阻率较大且温度系数较低的材料（如青铜合金、铝合金等）制成。为了减小零速输出电压，内、外定子通常设计成相对位置可调结构。

当在测速发电机的励磁绕组上施加稳频稳压电源 $\dot{U}_1$ 励磁时，便有电流 $\dot{I}_1$ 通过绕组，并产生以电源频率 f 脉振的磁动势 $\dot{F}_d$ 和相应的脉振磁通 $\dot{\Phi}_d$，$\dot{\Phi}_d$ 在空间按励磁绕组轴线方向（称为直轴 d）脉振，如果转子呈静止状态，直轴脉振磁通只能在空心杯转子中感应出变压器电动势。由于输出绕组的轴线与励磁绕组轴线空间位置相差 90°，它与直轴磁通没有匝链，故不产生感应电动势，输出电压为零。

当转子转动时，转子切割直轴磁通 $\dot{\Phi}_d$，并在转子杯中产生切割电动势 $\dot{E}_r$。在图 5.16-8 所示瞬间，$\dot{E}_r$ 的方向如图中外圈的符号所示。由于 $\dot{\Phi}_d$ 为脉振磁通，所以 $\dot{E}_r$ 为交变电动势，其交变频率为 $\dot{\Phi}_d$ 的脉振频率 f（即电源频率），其大小为 $E_r = C_n \Phi_d$。由于转子杯为短路绕组，电动势 $\dot{E}_r$ 将在转子杯中产生短路电流 $\dot{I}_r$；考虑到转子杯中漏抗的影响，$\dot{I}_r$ 将在时间相位上滞后 $\dot{E}_r$ 一个电角度，$\dot{I}_r$ 的方向如图中内圈的符号所示。同样，$\dot{I}_r$ 大小正比于 $\dot{E}_r$，频率为 f，它将产生脉振磁动势 $\dot{F}_r$。由 $\dot{F}_r$ 的交轴分量 $\dot{F}_{rq}$ 产生的交轴磁通 $\dot{\Phi}_q$ 与输出绕组轴线方向一致，它将在输出绕组中感应出频率为 f 的变压器电动势 $\dot{E}_2$，且 $E_2 \propto \Phi_q \propto n$。因此，空心杯转子异步测速发电机的输出电动势 $\dot{E}_2$ 的频率就是励磁电源频率 f，而与转速 n 无关，它的大小则正比于转速 n。也正是这种测速发电机的输出电压能够精确地反映它自身的转速，实现了其“测速”的功能。

由上述原理分析可以看出，空心杯转子异步测速发电机克服了同步测速发电机输出电压频率及负载阻抗因转速变化而变化的缺点。因此，空心杯转子异步测速发电机在自动控制系统中能得到广泛的应用。

4.2　输出特性

在理想情况下，异步测速发电机的输出特性应是直线，但实际上，异步测速发电机输出电压与转速之间并不是严格的线性关系，而是非线性的。运用对称分量法，可推导在励磁电压和频率不变的情况下，异步测速发电机的输出特性方程式如下

$$U_2 = \frac{An^*}{1 + Bn^{*2}} U'_1$$

$$n^* = \frac{n}{60f/p}$$

式中，n^* 为转速的标么值；A 为电压系数，是与测速发电机及负载参数有关的复系数；B 也为与测速发电机及负载有关的复系数。

由上式可知，因分母中存在 Bn^{*2} 项，所以输出电压 U_2 不再与转速 n 成正比，即输出电压与转速为非线性关系，输出特性不是直线而是一条曲线，如图 5.16-9 所示。可以推导，即使在空载时，输出特性方程式分母中同样还存在着与电机本身阻抗参数有关的 Bn^{*2}，异步测速发电机的输出电压与转速也不完全成正比关系。

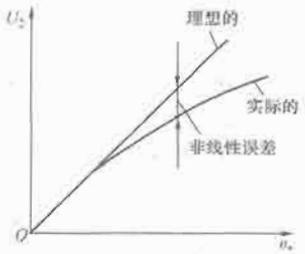


图 5.16-9　异步测速发电机输出特性

造成异步测速发电机输出特性非线性关系的原因，是测速发电机本身的参数随转速变化而改变，输出电压与励磁电压之间的相位差也是随转速而变化的。此外，输出特性还与负载的大小、性质以及励磁电压的频率、温度变化等因素有关。

从异步测速发电机输出特性关系式可以看出，输出电压的幅值和相位都随负载阻抗而改变。显然，希望测速发电机在运行时，输出电压仅与转速成正比，负载阻抗的变化对它的影响尽可能小。异步测速发电机输出电压与负载阻抗之间的函数关系是相当复杂的。在假定励磁电压不变、转速不变时，负载阻抗对测速发电机输出电压的影响可近似归纳如下：

1）接纯电阻负载，当负载电阻减小时，输出电压幅值也随之减小，而输出电压相位移将增大。

2）接纯电感负载，当负载电感减小时，输出电压的幅

值和相位移均会减小。

3）接纯电容负载。当负载容抗较大使输出绕组回路呈容性时，随着负载容抗减小，输出电压的幅值及相位移将随之增大；当负载容抗等于输出绕组的漏抗 x_{σ} 时，输出回路出现串联谐振现象，输出电压 $U_2=E_2 x_{\sigma}/r_{\sigma}$（$r_{\sigma}$ 为输出绕组电阻）；当负载容抗较小使输出绕组回路呈感性时，随着负载容抗减小，输出电压的幅值随之减小，而输出电压相位移将增大。

通过对异步测速发电机输出电压与负载之间关系的分析，可得出以下结论：

1）当异步测速发电机的转速一定，且负载阻抗足够大，无论什么性质的负载，即使负载阻抗有较大范围的波动，也不会引起输出电压有明显改变。

2）对于纯电阻负载和纯电容负载（当负载容抗 $x_1>x_{\sigma}$ 时），负载阻抗对输出电压的影响是相反的。所以，当测速发电机输出绕组接电阻-电容负载时，负载阻抗的变化对输出电压的影响可以互补，有可能使输出电压幅值不受负载变化的影响，但却增大了对输出电压相位移的影响，因为它们对相位移的影响是一致的。同样，为了补偿输出电压相位移的改变，可选择接电阻-电感负载，两者对输出电压相位移的影响正好互补，有可能使输出电压相位移不受负载变化的影响，但对输出电压幅值的变化不可能补偿。

在实际中到底选用什么性质的负载，是对输出电压的幅值还是对相位进行补偿，应视系统的需要来确定。一般希望输出电压幅值不受负载变化的影响，故常采用电阻-电容负载。

4.3 主要技术指标

对于空心杯转子异步测速发电机的指标体系，我国有两套标准，原国家标准（参照前苏联标准）与国家军用标准 GJB 777（参照美国军用标准）稍有区别，如对输出斜率、线性误差、剩余电压、变温误差、相位误差等指标有不同的定义、基准或取舍，具体区别可对照查阅两份标准。本节介绍的技术指标主要以国家军用标准指标体系为准。

1）电流和消耗功率。指励磁绕组中通过的电流和消耗的功率。异步测速发电机是一种信号元件，从电源吸收的电流和功率一般都比较小，电流约为几十毫安至几百毫安，消耗功率也仅有几瓦。

2）速敏输出电压。测速发电机输出电压中为速度函数的基波输出电压分量。它在数值上等于在相同转速和试验条件下，按两个旋转方向所测得的基波输出电压有效值之和的 1/2。

① 同相速敏输出电压。输出电压中与基准相位（励磁绕组的基波电压的相位）同相或反相的速敏输出电压分量。它等于在相同转速和试验条件下，按两个旋转方向所测得的同相基波输出电压之代数差的 1/2。

② 正交速敏输出电压。输出电压中与基准相位成 90°或 270°相位移的速敏输出电压分量。它等于在相同转速和试验条件下，按两个旋转方向所测得的正交基波输出电压之代数差的 1/2。

3）速敏电压比。在转速范围内任一规定转速（通常为校准转速）下，速敏输出电压与基波励磁电压之比。

4）同相（正交）速敏电压比。在转速范围内任一规定转速（通常为校准转速）下，同相（正交）速敏输出电压与基波励磁电压之比。

5）校准转速。异步测速发电机测试时补偿点的转速，通常为最大线性工作转速的 5/6。

6）最大线性工作转速。在允许线性误差范围内的最高工作转速。

7）输出电压相位移。励磁电压基波分量与输出电压基波分量之间的时间相位差。它等于在相同转速和试验条件下，正交速敏输出电压与同相速敏输出电压之比的反正切函数，以（°）表示。

8）线性误差。在规定条件下，实际输出电压与理论输出电压之差同最大理论输出电压之比，以百分数表示。下面用图 5.16-10 说明线性误差的工程计算原理。

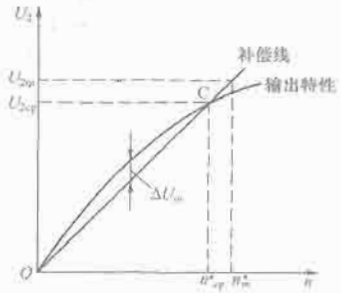


图 5.16-10 线性误差的工程计算原理图

如图 5.16-10 所示，工程上选取输出特性上对应于 $n^*_{co}=\frac{\sqrt{3}}{2}n^*_m$ 的点作为补偿点 C，并将它与坐标原点连成直线，也称为补偿线。其中 n^*_m 为测速发电机的最大相对转速。选取直线输出特性和实测输出特性之间的最大绝对误差 ΔU_m 与直线输出特性所对应的最大输出电压 U_{2m} 之比来表明测速发电机输出特性的非线性度，并称该比值为线性误差。

9）同相线性误差。按国家军用标准定义为：在规定条件下，实际的同相速敏电压比与理论的同相速敏电压比之差同最大理论同相速敏电压比之比，以百分数表示。

$$\Delta L_i=\left(\frac{K_i-\frac{n}{n_c}K_{ic}}{\frac{n_{max}}{n_c}K_{ic}}\right)\times 100\%$$

式中，ΔL_i 为同相线性误差；K_i 为在规定转速范围内任意转速 n 时的实际同相速敏电压比；K_{ic} 为在校准转速 n_c 时的同相速敏电压比。

10）零速输出电压。在转速等于零时输出绕组两端产生的电压，它是转子位置的函数。

① 零速输出电压总有效值。在产生最大零速输出电压的转子位置时，零速输出电压的总有效值。

② 零速输出电压基波有效值。在产生最大零速输出电压的转子位置时，零速输出电压的基波有效值。

③ 同相零速输出电压。零速输出电压基波有效值中，与基准相位同相或相移 180°分量的最大值。

④ 正交零速输出电压。零速输出电压基波有效值中，与基准相位相移 90°或 270°分量的最大值。

11）位置误差电压。零速输出电压随转子位置在 0°～360°之间改变而变化，其基波有效值的最大值与最小值之差的 1/2 为位置误差电压。它可分解为同相和正交两种分量。

12）轴误差电压。基波输出电压中与转子位置、转速无关的部分。它在数值上等于在相同转速和试验条件下，按两个旋转方向测量的基波输出电压之差的 1/2。它可分解为同相和正交两种分量。

13）电压敏感度。当励磁电压相对其额定值变化时，引起测速发电机的零速输出电压、同相速敏电压比和相位移等性能变化的敏感程度。

14）频率敏感度。当励磁电压的频率相对其额定值变化时，引起测速发电机的零速输出电压、同相速敏电压比和相

位移等性能变化的敏感程度。

15）温度敏感度。异步测速发电机由于自身发热或环境温度变化引起测速发电机的零速输出电压、同相速敏电压比和相位移等性能变化的敏感程度。

4.4　零速输出电压产生的原因及降低措施

零速输出电压是空心杯转子异步测速发电机设计、制造及使用中最为关注的问题之一，它分为基波分量和谐波分量，其产生的主要原因如下：

1）加工工艺误差造成的电路和磁路的不对称。

2）导磁材料内部晶格排列及尺寸的不均匀。

3）寄生分布电容的影响。

4）励磁电源电压波形的非正弦性。

5）磁路饱和的影响。

针对零速输出电压分类及产生原因，可采取以下措施降低零速输出电压：

1）选择较低的铁心磁通密度，以降低磁路的饱和程度，减小零速输出电压的高频分量；采用磁性槽楔，更有效地避免局部（齿部）饱和的影响。此外，在产品加工过程中，防止铁心片间短路也很重要。

2）采用单层集中绕组和可调铁心结构。因为单层集中绕组每极下只有一个线圈，容易保证磁路的对称性，且不会因为匝间短路而引起椭圆形旋转磁场。在结构设计时通常将励磁绕组和输出绕组分别放置在内、外定子铁心上，并将内定子设计成相对于外定子位置的可调结构。在测速发电机装配时，可转动内定子铁心使输出绕组的零速输出电压达最小，并在该位置固定内定子铁心，这样通过人为调整使零速输出电压明显减小。

3）选用外定子齿数为内定子齿数的偶数倍，构成“无磁耦合”结构，这样励磁绕组产生的磁通仅通过内定子的齿部，并不与输出绕组匝链，零速输出电压也随之降低。

4）内、外定子均采用错片叠装，同时按冲片压延方向冲制冲片，以保证各向导磁性能相同。下线时注意沿磁对称方向下线，有利于保证绕组轴线与铁心磁路轴线重合。

5）为修正磁路的不对称性，有时还须采用在铁心上开沟槽和修正槽口等补救措施。

6）由于转子空心杯不均匀引起的零速输出电压，主要是通过合理选择零部件尺寸公差及形位公差，正确选择晶格均匀的转子空心杯材料与加工工艺等措施来加以克服。此外，还可通过试验测试，检测出转子空心杯的不均匀部分的分布，通过将其不均匀部分磨削加工等校正措施，也是常用的减小零速输出电压的有效方法。

7）对于较大机座号，常采用增加补偿绕组，以减小零速输出电压。补偿绕组既可以安放在励磁绕组槽内，也可放置在输出绕组槽内，其匝数可根据实际需要来确定。补偿线路有两种：串联移相电压补偿（见图 5.16-11 ）和磁通补偿（见图 5.16-12）。

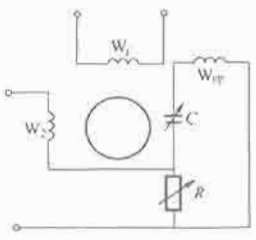


图 5.16-11　串联移相电压补偿原理图

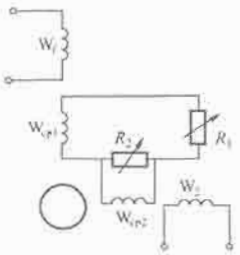


图 5.16-12　磁通补偿原理图

8）外接补偿装置。异步测速发电机实际使用时，还可以采用外接补偿装置的办法补偿零速输出电压，也称为阻容电桥补偿法，如图 5.16-13 所示。

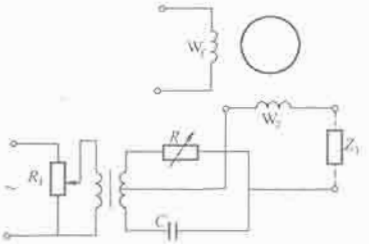


图 5.16-13　阻容电桥补偿法原理图

外接补偿装置产生的附加电压，其大小接近于零速输出电压的固定分量，而相位则刚好相反。这种补偿方法可使零速输出电压降到最小，一般只有几毫伏。调节电阻 R_1 的大小可以改变附加电压的大小；调节电阻 R 的大小则可以改变附加电压的相位，以达到完全补偿零速输出电压的目的。

4.5　误差及补偿

异步测速发电机与直流测速发电机一样，要求具有高精度，如较高的输出斜率（速敏输出电压）、较低的线性误差和较小的零速输出电压，此外还要求较小的相位移及较低的相位误差等。而气隙磁通的变化、励磁电源的影响以及温度变化等都将会引起异步测速发电机产生误差。

为减小误差而相应采取的措施主要有：

1）针对气隙磁通的变化，可采用增大转子电阻及提高励磁电源的频率（异步测速发电机大都采用 400Hz 的中频励磁电源）来减小输出电压的误差。

2）针对励磁电源的影响，应采用稳频、稳压的正弦波电源励磁。

3）针对温度变化的影响：一方面，设计时，转子空心杯及励磁绕组应选用电阻温度系数较小的材料；另一方面，可采用温度补偿的办法，具体补偿方法有：

① 励磁绕组补偿法。在励磁回路接入热敏电阻网络，其原理图如图 5.16-14 所示。

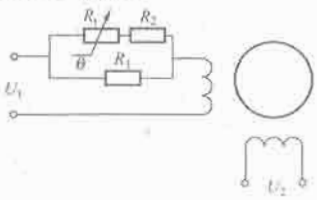


图 5.16-14　励磁绕组补偿原理图

利用热敏电阻的电阻值随温度升高而呈指数曲线下降的特性，合理设计热敏电阻网络，使补偿电路的等效电阻随温度增加而降低的值恰好等于测速发电机绕组电阻的增加值，达到理想的温度补偿的效果。

② 输出绕组补偿法。在输出回路中接入热敏电阻补偿网络，其原理图如图 5.16-15 所示。

当给补偿网络施加一个恒流电源时，在补偿电路中将产生一个压降 ΔU。合理设计补偿网络的参数，使 ΔU 值等于测速发电机输出电压随温度变化的变动值，使总的输出电压保持不变。

③ 磁场补偿法。如图 5.16-16 所示。

补偿绕组和输出绕组嵌在同一铁心上，并在空间成 90°。当测速发电机磁通发生变化时，补偿绕组中的感应电动势也将发生变化，反馈系统将此变化值通过比较处理后施加于励

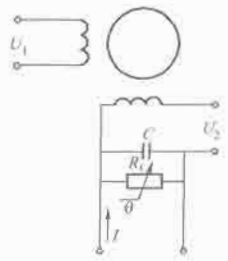


图 5.16-15 输出绕组补偿原理图

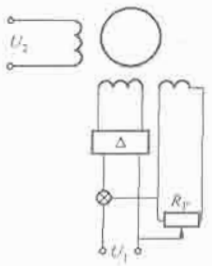


图 5.16-16 磁场补偿原理图

磁绕组上，以保持测速发电机的磁通不变，从而使输出电压保持恒定。

5 其他型式测速发电机

5.1 低速永磁直流测速发电机

低速永磁直流测速发电机亦称高灵敏永磁直流测速发电机，具有输出斜率高、纹波系数小、不灵敏区小、电刷与换向器磨损小、转动惯量大等特点。它可与系统的工作轴直接耦合以提高系统的精度和刚度，通常与直流力矩电动机匹配构成直流力矩测速发电机组，用在高精度低速伺服系统中，如惯性导航平台、雷达天线驱动等。

低速永磁直流测速发电机除具有一般直流测速发电机的优点外，还具有以下特点：

(1) 结构特点

低速永磁直流测速发电机结构外形呈扁平形，如图 5.16-17 所示。该类测速发电机一般不带机壳和转轴，即为分装式结构，可直接与主机的主轴、轮毂及机座装配在一起。测速发电机的槽楔为金属槽楔，并兼作换向片用，最后用环氧树脂将测速发电机绕组端部及换向片灌封成一个整体，因而结构紧凑，特别适用于要求尺寸小、重量轻的使用场合。

(2) 性能特点

1) 输出斜率高、响应快。由于采用扁平结构、极数多且有效导体数多，因此输出斜率可达一般测速发电机的数十倍甚至上百倍。这对提高系统的稳定性极为有利。同时，由于电枢电感一般较低，对于提高输出响应速度有利。

2) 线性误差及纹波系数小，低速准确度高。低速永磁直流测速发电机一般负载电阻很大，因此其线性误差较小。又由于极数及槽数较多，其纹波系数也低于一般测速发电机。

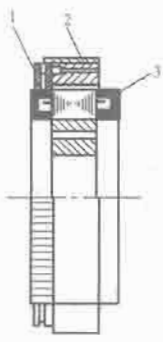


图 5.16-17 低速永磁直流测速发电机结构图

1—电刷装配；2—定子；3—电枢

3) 可靠性好、寿命长。由于结构简单并与主机同轴连接，保证了低速测速发电机的可靠性。又由于工作转速低，电刷磨损小，其工作寿命长。

5.2 永磁直流直线测速发电机

永磁直流直线测速发电机的输出电压与运动速度成正比，无电刷与换向器，运行可靠性高，主要用在直线运动的伺服系统中作速度、加速度检测元件及微分元件。

5.2.1 基本原理和结构

根据电磁感应原理，绕组沿偏离磁场磁力线的方向运动时，在绕组两端将感应出电动势。永磁直流直线测速发电机的结构如图 5.16-18 所示。

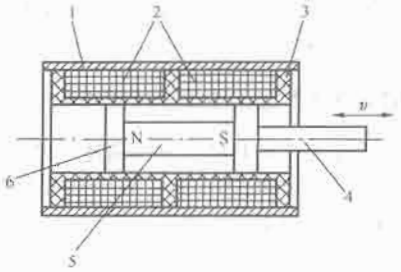


图 5.16-18 永磁直流直线测速发电机结构原理图

1—机壳；2—定子绕组；3—定子绝缘；4—连杆；5—永磁体；6—动子磁轭

当由永磁体构成的“动子”沿轴线移动时，由永磁体产生的磁通切割分布在定子上的输出绕组，绕组内将感应出与“动子”运动速度 v 成比例的电动势，这就是永磁直流直线测速发电机的基本原理。

5.2.2 设计要点

为了获得较高的输出斜率及线性输出特性，应合理地选择每只线圈的匝数、线圈轴向长度及磁钢的有效磁通等参数。

在永磁体尺寸确定时，应在保证最大输出电压的前提下，根据永磁体性能的不同选择最佳长径比，使永磁体磁性能得到最佳利用。

在线圈长度确定时，应根据实际工作行程，确保在整个行程内电压纹波系数较小。一般线圈轴向长度应大于工作行程的 1.5 倍。线圈密度沿轴向的均匀性也是减小输出电压脉动的重要参数，否则各点的输出电压将不相等。

5.3 无刷直流测速发电机

无刷直流测速发电机主要包括霍尔效应无刷直流测速发电机和电子换向无刷直流测速发电机，本节仅介绍后一种。

电子换向无刷直流测速发电机是一种机电一体化产品。它以电子换向电路代替了有刷直流测速发电机的电刷及换向器，从而克服了有刷直流测速发电机因机械换向所引起的种种缺点，又保持了有刷直流测速发电机外特性的优点。无刷直流测速发电机原则上可使用于有刷直流测速发电机的所有应用领域，特别适用于高真空、低气压、强振动冲击、有害介质及易爆等一般有刷直流测速发电机难以适应的恶劣环境。

无刷直流测速发电机原理框图如图 5.16-19 所示。测速发电机本体为多相永磁交流发电机，定子上放置有多相对称绕组，转子为永磁体，并安放有霍尔元件作为转子位置传感器。当永磁转子被原动机驱动旋转时，定子绕组中将感应出多相（m 相）相互相移为 $2\pi/m$ 的平顶梯形电压波。它们分别被送到开关电路的输入端，此时位置传感器信号也经过逻辑处理，分别用于控制开关电路的通断，对 m 相交流电压平顶波依次进行分段采样，然后在加法放大电路中将各段采样信号组成正比于转速的直流电压输出。

当被反向驱动时，交流发电机的平顶梯形波随之反相，通过采样后从加法放大器输出极性相反的直流电压。

无刷直流测速发电机中的多相永磁交流发电机与普通永磁交流发电机最大不同之处在于其定子绕组感应电动势为平顶梯形波，且对其波形的顶部宽度和平坦度有严格要求。它的电动势波包含有丰富的谐波，而普通交流发电机则要千方

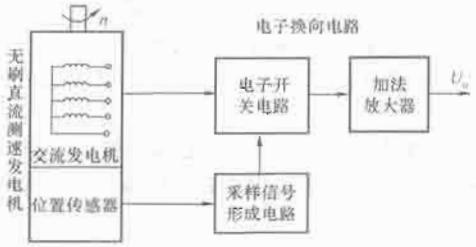


图 5.16-19 无刷直流测速发电机结构原理框图

百计去减小这些谐波分量。

5.4 脉冲测速发电机

脉冲测速发电机是一种鉴频型机电感应式测速元件。它以输出电压的频率来反映测速发电机的转速，其工作原理是基于感应子发电机原理。它的输出脉冲信号频率与转速成正比，主要用于数字伺服系统中作速度检测元件。

脉冲测速发电机一般输出电压的频率都比较高，转子每转 1r，定子绕组输出的脉冲个数（周期数）能达几十、几百甚至上千个。

脉冲测速发电机的结构型式比较多，下面着重介绍两种结构以说明其工作原理。

如图 5.16-20 所示，在定子上有两段铁心，其内圆表面上有很多齿槽，两者齿数相等，但在空间错移 1/2 齿距。两定子铁心之间的空腔内布置集中的输出绕组。转子铁心的外圆表面也有很多齿槽。一般定、转子齿槽数是相等的。定、转子上还各有 1 个磁环，用以构成闭合磁路。在转子铁心和磁环间放置有轴向磁化的永磁体。当转子静止时，永磁体在测速发电机气隙中建立的磁场是静止的，其方向和大小均不变化，因而在定子绕组中不会感应电动势，但是当转子以一定速度旋转时，由于定、转子齿槽间的感应子作用（定、转子齿槽间相对位置改变导致气隙磁导的改变），使测速发电机气隙磁导发生周期性变化，这样匝链定子绕组的磁通就发生数值上的周期性变化，因而在其中感应交变电动势，其频率为

$$f = \frac{Z_2 n}{60}$$

式中，Z_2 为转子齿数；n 为转子转速，r/min。

上式说明输出电动势的频率与转速成正比。正是利用这种正比关系，实现用脉冲测速发电机的输出电动势的频率来“测速”的目的。

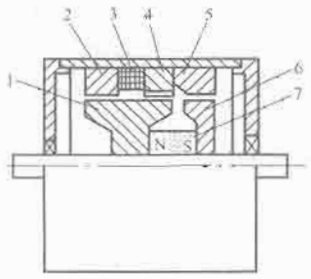


图 5.16-20 脉冲测速发电机结构图

1—转子铁心；2—定子铁心；3—输出绕组；4—定子铁心；5—定子磁环；6—转子磁环；7—永磁体

脉冲测速发电机的另一种结构如图 5.16-21 所示。

测速发电机的励磁绕组和输出绕组都布置在定子铁心上，每个定子齿上都有 1 个励磁线圈和 1 个输出线圈，所有的励磁线圈以一正一反的型式串联在一起。当励磁绕组施加直流电压时，定子相邻的极性相反。每个定子齿上的输出绕组并不互相串联而是独立存在。转子上仅制成均匀分布的齿槽，且使转子齿数 Z_2 和定子齿数 Z_1 必须满足 $Z_2 = Z_1 + 1$ 的条件。

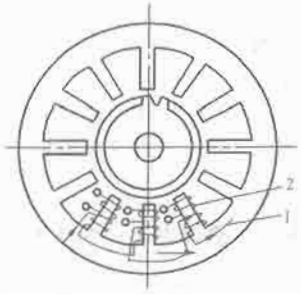


图 5.16-21 脉冲测速发电机结构图

1—励磁线圈；2—输出线圈

这种脉冲测速发电机的工作原理是：当测速发电机旋转时，由于定、转子齿之间几何位置的周期性变化，对于定子任一个齿，它对应的气隙磁导也将发生周期性变化（即所谓感应子效应），因而匝链每个输出绕组的磁通将发生数量上的周期性变化，从而在其中感应电动势。转子每转 1r，每个输出绕组中都会感应频率为 $f = Z_2 n/60$ 的电动势，定、转子任一对齿的轴线一致时，相邻一对定、转子齿的轴线的几何位移角为

$$\theta = 2\pi\left(\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2}\right)$$

则相邻输出绕组感应电动势间的相位移为

$$\varphi = 2\pi\left(\frac{Z_2}{Z_1} - 1\right)$$

由于相邻输出绕组感应电动势间相位移 φ 的存在，所以若把所有输出绕组的信号分别送入整形放大器处理，当转子转 1r 时，在整形放大器的输出端就会获得 $\sum_{1}^{Z_1} Z_2 = Z_1 Z_2$ 个脉冲信号。显然，这种结构的脉冲测速发电机的脉冲数是相当多的。

6 测速发电机的选型

6.1 直流测速发电机的选型

直流测速发电机的结构型式及品种规格较多，在使用时应根据实际使用要求选择合适的品种类别。

1）在选型时应特别注意分析系统的工作速度范围、主要指标要求、结构和所接负载的大小等各种因素，选择满足系统使用要求的合适品种。例如：对于低速系统，特别关注低速平稳性及高精度，此种场合应选用直接耦合的高灵敏度分装式低速直流测速发电机；对于最低转速为每分钟几百转以上的中高速小功率直流随动系统，对测速发电机的要求是以输出信号的高精度为主，选型时应注意选择以输出斜率、线性误差等精度指标为主的产品，而对其输出功率指标可仅作为参考（几瓦以内）；对于功率消耗相对较大的速度控制系统，应选择功率输出型直流测速发电机（几十瓦到几百瓦），否则将不能满足系统的正常运行。

从直流测速发电机在系统中所起作用的角度，选型时应考虑以下几点：用作解算元件时，应选择线性误差小和输出电压稳定性好的产品；用作一般转速检测或作阻尼元件时，应选择输出斜率高的产品；当系统有快速响应性要求时，应选择转动惯量较小的产品。

2）由于测速发电机存在变温误差，选型时应注意系统

的环境及工作温度变化情况。对于精密伺服系统及工作温度变化范围较大的伺服系统，应注意选择变温误差小或带温度补偿的直流测速发电机。

3）对于工作环境比较特殊的使用场合，如真空状态、易燃易爆场合、电磁干扰要求严格的环境，应选择无刷直流测速发电机。

6.2 空心杯转子异步测速发电机的选型

由于空心杯转子异步测速发电机线性误差、消耗功率和惯性矩低，且输出电压频率不随转速而变化，因此，它是唯一适用于小功率随动系统和解算装置的交流测速发电机。在选型时应根据系统和装置的频率、电压、工作转速范围和具体用途进行选择。由于此类测速发电机外形尺寸一般都比较小，输出斜率也比较低，结构强度较差，输出功率小，所以大功率随动系统不宜采用。选用时还应根据自动控制系统的功能特点来选择合适的品种，提出切合实际的技术要求，往往一项技术指标的合理降低可以使另一项指标得到明显改善。

空心杯转子异步测速发电机按其功能特点可以分为比率型、积分型和阻尼型。比率型有较高的速敏输出电压对零速输出电压的比值，低的线性误差及相位移；积分型除具有更高的输出特性要求外，一般还具有温度控制和补偿网络，其变温误差小；阻尼型具有高的理论堵转加速度，因此用作解算元件时，应着重考虑选择线性误差小及输出电压稳定性好的积分型；作一般检测元件或作阻尼元件时，则应选择输出斜率高的比率型或阻尼型。

7 测速发电机的使用、常见故障及维护

7.1 直流测速发电机的使用、常见故障及维护

7.1.1 使用注意事项

1）直流测速发电机在出厂前，电刷位置已经严格调整到合适位置，使用中不允许松动刷架系统的紧固螺钉，以免影响其精度。

2）所接负载电阻应大于规定值，以避免因性能指标的下降导致系统误差增大，甚至出现“失控”。

3）转速应不超过最大线性工作转速，否则线性误差将会增大。

4）永磁直流测速发电机的周围应避免强磁场存在，以免影响测速发电机输出特性的稳定。

5）对采用铝镍钴永磁体的永磁直流测速发电机，不允许将转子从定子中抽出，以免永磁体因开路而失磁。

6）应注意温度变化导致输出斜率的变化。

7.1.2 常见故障及维护

由于直流测速发电机具有电刷与换向器的摩擦接触环节，常见故障多与该环节相关，因而应注意对这一环节的维护和保养。

1）电刷组件中弹簧的压力不合适或不一致，造成电刷与换向器间的接触不良，导致输出电压不稳定或纹波系数增大。使用者一般不易处理，应将测速发电机送回制造厂进行维修。

2）电刷与换向器磨合不到位，两者之间的接触面积未超过75%，造成电刷与换向器间的接触不良，导致输出电压不稳定或纹波系数增大。使用时可增加磨合时间使电刷接触面积增大。

3）由于使用时间过长而电刷磨损严重，超过允许限度，造成电刷压力减小，电刷与换向器间的接触不良，或炭粉堆积过多造成换向器片间局部短路，导致输出电压不稳定或纹波因数增大，应及时换上新电刷。再将测速发电机空转一定时间以上，使新电刷与换向器的磨合面积达到75%以上，并清除炭粉。

4）由于各种外来因素造成永磁体磁性能下降，导致输出斜率降低。使用者一般不易使磁性能恢复，应将测速发电机送回制造厂进行维修。

5）对于长期库存未使用的测速发电机，在使用前应检测其绝缘电阻是否符合规定，同时检查各项指标是否符合要求，并空转一定时间以去除由于长期不工作在换向器表面产生的氧化膜，消除由此产生的初期接触不良现象。

7.2 空心杯转子异步测速发电机的使用、常见故障及维护

7.2.1 使用注意事项

1）由于空心杯转子异步测速发电机的输出阻抗较大，所以一般要求负载阻抗大于或等于50～100kΩ。其输出特性一般都是在空载条件下给出的，而不同的负载性质将对性能产生影响，使用时应充分注意。当接负载后，应对输出斜率、线性误差、相位移等进行实测，并用以校正系统参数。

2）空心杯转子异步测速发电机在出厂前都经过严格调试，以使其零速输出电压达到最小。使用中严禁拆卸，否则零速输出电压将急剧增加甚至无法使用。

3）空心杯转子异步测速发电机定、转子间的气隙大，输入阻抗较小，所以要求励磁电源的内阻抗及电源与测速发电机之间的连线阻抗应尽量小。

4）电源电压和频率波动都会引起异步测速发电机输出电压幅值和相位移的变化。对于400Hz测速发电机，在任何转速下频率每变化1Hz，输出电压将变化0.03%，故在精密系统中，必须保持电源电压和频率的稳定。

5）温度变化会引起异步测速发电机输出特性的变化，故在工作达到热稳定后应调整系统参数。对于精密系统，还应采用温度控制和补偿网络。

6）由于异步测速发电机是一种精密控制元件，使用中应注意保证它和驱动它的伺服电动机之间连接的高度同心和无间隙传动，否则会使测速发电机损坏或导致系统误差增加。此外，应按照规定的安装方式正确安装，保证各部分受力均匀，避免零速输出电压增大。

7）异步测速发电机可以在超过最大线性工作转速1倍左右的转速下工作，但随着工作转速范围的扩大，其线性误差、相位移都将大幅度增大。例如，工作转速范围扩大1倍时，线性误差将是原来的4倍左右。

7.2.2 常见故障及维护

空心杯转子异步测速发电机是一种无接触式交流发电机，通常不需特殊维护。

1）若由于制造厂装配中紧固螺钉不牢或其他原因造成内外定子间相对位置变化，导致零速输出电压增加的，使用者一般不易调整，应送回制造厂进行重新调整。

2）若由于制造厂接线标志混乱或使用中接线错误，导致输出电压相位倒相和零速输出电压与出厂要求不符，可改变接线使其恢复正常。

7.3 脉冲测速发电机的使用、常见故障及维护

1）使用时应注意保证安装同心度，避免安装不当造成测速发电机变形而使气隙不均匀，导致测速发电机卡死或输

出信号不均匀。

2）由于测速发电机自身不带整形放大电路，使用时用户应自配整形放大电路，其输入阻抗应与脉冲测速发电机的输出阻抗相匹配。

3）脉冲测速发电机是鉴频型测速发电机，其输出信号幅值是转速的函数，但不成正比关系，速度越高，输出电压幅值偏离线性的误差越大。使用时可自配限幅、整形放大电路，以保证在一定转速范围内的输出电压幅值基本不变。

4）应注意脉冲测速发电机输出信号不能判别旋转方向。

5）由于此类测速发电机为永磁式，使用时在不清楚永磁体类别的情况下不允许任意拆卸。使用场合周围也应避免存在强磁场，以免影响输出信号的稳定性。

8　测速发电机的应用实例

8.1　直流测速发电机的应用实例

直流测速发电机在民用工业中的应用是十分广泛的，下面介绍几个应用实例。

（1）在大型轧钢机中的应用

直流测速发电机在大型轧机中主要用作速度伺服系统的速度检测元件。图 5.16-22 是某钢厂 1.7m 热连轧机主机 R2 机架三环控制系统框图。

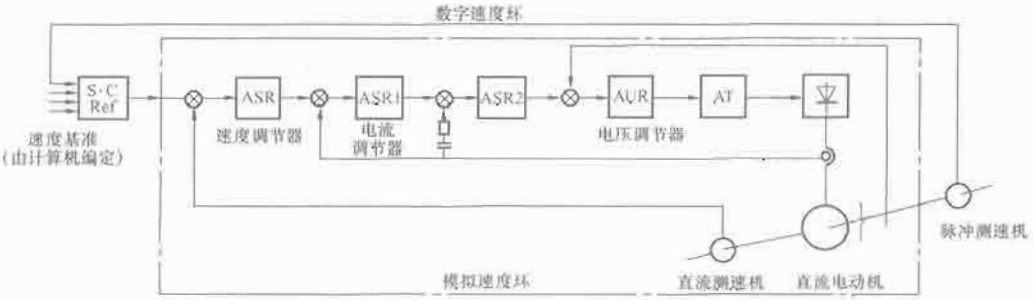


图 5.16-22　热连轧机粗轧机三环控制系统框图

该系统除包含速度调节环外，还设计有电压调节环和电流调节环，后两部分是为了改善系统动态特性，并在动态过程中起保护主电动机和整个装置的作用。直流测速发电机在速度调节环中的功能是保证比较高的调速精度，它随时向系统提供增速或减速信号，该系统的调速精度可达0.5%～1%。

在热轧精轧机和冷连轧机中，为了保证更高的精度，除采用直流测速发电机构成模拟速度环外，还增加了采用脉冲测速发电机构成的数字速度环，作为速度的精调环节。采用这种措施的调速系统的精度可达 0.03%。

（2）在高精度数控机床上的应用

由直流测速发电机和直流宽调速伺服电动机构成的宽调速直流伺服-测速机组已广泛用于数控机床的主轴系统和进给系统。

专门设计的直流宽调速伺服电动机的调速范围就比一般直流伺服电动机的调速范围大好几倍，而采用永磁直流宽调速伺服-测速机组的伺服系统的调速比可达 1∶10000 以上。

（3）在精密低速转台中的应用

低速转台是一种应用十分广泛的设备，如在实验室、雷达装置、医疗设备中都有应用。它作为一种低速宽调速稳速源可用作低速测速发电机试验的稳速驱动装置。图 5.16-23 是由直流放大器精密直流力矩电动机和精密低速直流测速发电机构成的低速伺服系统。

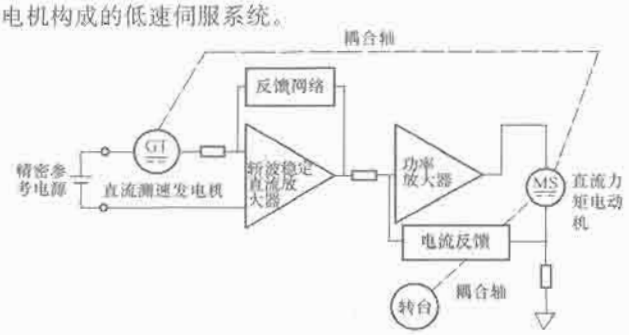


图 5.16-23　低速直流伺服系统

该系统的功能如下：直流测速发电机的输出直流电压与精密参考电压相加，该信号输入斩波稳定直流放大器，斩波稳定直流放大器具有适当的反馈，以确保伺服系统回路稳定性和精确度。斩波稳定直流放大器的输出驱动功率放大器，后者去驱动直流力矩电动机。系统中为消除直流力矩电动机电枢电阻随温度变化而发生的变化所产生的影响，附加了从直流力矩电动机电枢回路返回功率放大器输入端的电流反馈。显然，在这个系统中，直流测速发电机构成了它的主反馈回路，它对保证系统精度是十分重要的。对于任意转速，直流测速发电机输出电压自身的任何变化都会产生速度误差。例如，当直流测速发电机因本身发热或者周围环境温度变化引起输出电压的变化或者直流测速发电机输出电压恒定分量叠加的交变分量都将导致产生系统误差。

设计良好的这种系统，可在 0.01°/s～600°/s 的速度范围内可靠工作，静态精度可达 0.1%，抖动和脉动干扰小于 0.1%平均峰值。

8.2　空心杯转子异步测速发电机的应用实例

1）用作阻尼。当系统发生振荡时，它能够向系统提供一个加速或减速信号，产生阻尼作用，促使系统振荡加速衰减，从而提高系统的稳定性和准确度。图 5.16-24 是采用异步测速发电机增加系统黏滞阻尼的简单交流远距离定位伺服系统的原理图。

在这个系统中，异步测速发电机的输出信号和来自自整角变压器的控制信号同时输入加法网络进行代数相加，当系统接近协调位置时，它的相位是和控制信号反相的；而当系统调整出现超调时，异步测速发电机输出信号的相位仍和原来相同，但此时控制信号的相位已与原来相反，这样两个信号的相位是一致的，因而两信号相加，该合成信号经伺服放大器放大后将促使伺服电动机产生一个很大的制动转矩，以使系统的振荡衰减下来。

2）用于速度伺服。在某些仪器和实验设备中，往往要求驱动设备主轴的伺服电动机的速度与某一输入电压成正比。为了实现这个要求，就需要采用速度伺服系统，这种系

统的原理如图 5.16-25 所示。

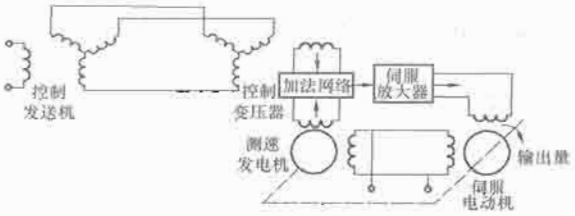


图 5.16-24 交流远距离定位伏服系统原理图

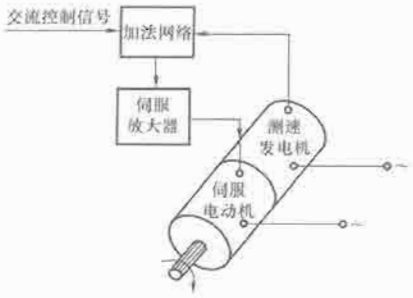


图 5.16-25 速度伏服系统原理图

在该系统中，异步测速发电机的输出电压反映了伏服电动机的转速，交流控制信号减去这个电压后的差值信号经伏服放大器适当放大后，加于伏服电动机的控制相，驱动伏服电动机。应该注意的是，伏服电动机追随控制信号的精度与异步测速发电机的线性误差和温度误差直接相关（当然也与放大器的增益有关），而异步测速发电机剩余电压的存在则影响伏服电动机的低速运转和产生无控制信号输入时的空转。对这种系统来说，应选用比率型异步测速发电机。

3）用于积分系统。如果在控制系统中需要得到代表某一输入函数积分值的电压或轴位移，就需要采用积分伏服系统。

图 5.16-26 是采用异步测速发电机作为积分元件的积分伏服系统的原理图。

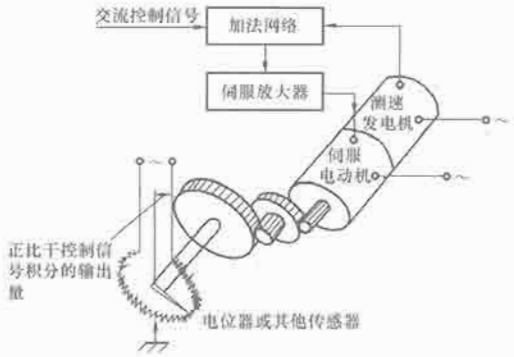


图 5.16-26 积分伏服系统原理图

积分伏服系统的一个重要使用场合是用它校正微小的误差，若不校正，该误差将会导致误差积累。例如：飞机上的自动驾驶仪未能将飞机调整到准确姿态，飞机就会逐渐增加或降低高度。反之，如果将高度误差通过积分系统加以积分，就能将高度误差累积成一个能用来校正飞机倾角的信号。由图 5.16-26 看出，积分系统实际上是速度伏服系统和与其机械角相连接的传感器构成，积分量则由传感器输出。在理想状态下，一定时间内的转轴转数即代表输入控制电压的积分。若输入控制电压为 $f(t)$，则转轴的转角为

$$\theta = k\int_0^t f(t)\mathrm{d}t$$

通过传感器将正比于输入控制电压积分量的转数转换为电信号输出。

用于积分伏服系统的异步测速发电机要求有更高的线性精度，更小的剩余电压，尤其是要求有更小的温度误差，积分型异步测速发电机适用于该系统。

8.3 脉冲测速发电机的应用实例

要达到精确度很高的转速调节，应用传统的模拟闭环转速控制已有困难，特别是应用这种控制技术于环境温度变化很大的场合以及电源电压难以控制的地方，即使在提供模拟信号（鉴幅型测速发电机）的元件中采用温度补偿措施和尽量提高控制精度能实现提高转速调节精度，这种系统的可靠性也比较差，而且价格很昂贵。

采用数字控制技术后，利用稳定的频率源作为速度的给定，而采用鉴频型测速发电机-脉冲测速发电机作为被控转速的速度敏感元件。

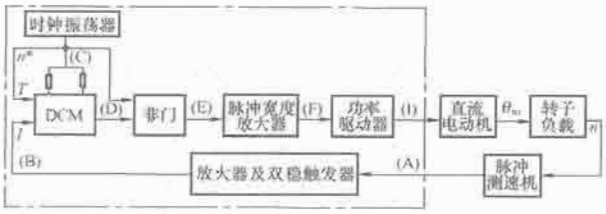


图 5.16-27 数字转速控制系统原理框图

图 5.16-27 是数字转速控制系统的原理框图。它的工作原理如下：脉冲测速发电机产生与直流电动机转速 n 成正比的脉冲系列 A（与频率相当）。该信号经预放大处理（是否需放大视测速发电机输出信号大小而定）使其有足够的功率去触发双稳触发器。双稳触发器将脉冲系列 A 转换为方波系列 B，其周期 T_B 与 n 成正比。将信号 B 送入脉冲宽度调幅器（DCM），同时由时钟振荡器提供的周期为 T_C 的方波也输入 DCM（时钟信号即对应转速给定 n^*），DCM 输出端产生周期为 $T_D = R_M T_B / R_D$ 的方波 D，其前沿与时钟脉冲系列 C 的前沿相重合，因此脉冲系列 D 的重复频率与时钟振荡器信号的频率相同（即同步），由于 D 与 C 同步，因此它们的周期可以相加。该两信号 D 与 C 同时送入非门，则非门的输出为误差信号脉冲 E，其周期为 $T_E = T_C - T_D$（对应于 $n > n^*$）。脉冲系列 E 送入脉冲宽度放大器，其输出送入功率驱动器，该功率驱动器供给电动机电流 I。当输入脉冲 E 高时，功率驱动器将 I 切断；而当 E 低时，将 I 投入，电动机转矩 θ_m 的响应与绕组平均电流成比例。因此 E 为过速误差时，θ_m 被降低，电动机将减速到与负载转矩相等时为止，从而获得了系统的稳定运行。欠速过程的调整原理与过速过程的调整类同。该转速控制系统的最大稳定精度可达 0.06% 以上。

9 典型产品技术数据

9.1 CY 系列永磁式直流测速发电机

CY 系列永磁式直流测速发电机技术数据见表 5.16-1～表 5.16-4。

表 5.16-1 CY 系列技术数据（一）

型 号	输出斜率 [V/(kr/min)]	纹波系数 (%)	最大线性工作转速 (r/min)	线性误差 (%)	电枢电阻 (Ω)（±12.5%）
20CY002	3	1	3500	1.2～3	120
28CY001	7	3（在 100r/min 下）	12000	0.1	580
36CY001	10	1	6000	0.1～0.5	160
45CY003	15	3	3600	0.1	50
75CY001	120	≤1	2500	≤1	190

表 5.16-2 CY 系列技术数据（二）

型 号	输出斜率 [V/(kr/min)]	线性误差 (%)	最大线性工作转速 (r/min)	纹波系数 (%)	输出电压不对称度 (%)	最小负载电阻 (kΩ)
28CY01	5	±1	3000	≤5	±1	10
75CY02	60	0.5	3000	0.5	0.5	2.25
110CY01	100	≤0.5	1000	≤0.5	≤0.1	1
130CY01A	40	≤0.5	4500	≤0.5	≤0.5	10
130CY02	100	≤0.5	600	≤0.5	≤0.5	4
180CY01	333	≤0.5	300	≤0.5	≤0.5	0.5
180CY02	100	≤0.5	1000	≤0.5	≤0.5	0.5

表 5.16-3 CY 系列技术数据（三）

型 号	电压 (V)	额定转速 (r/min)	电流 (A)	线性误差 (%) ≤	不对称度 (%) ≤	外形尺寸（mm）			质量 (kg)
						总长	外径	轴径	
110CY-01	110	1000	0.21	2	1	242	110	14	7.9
110CY-02	110	2000	0.21	2	1	242	110	14	7.9
72CY01A	24	2000	0.002	2	1	88	72	6	
72CY02A	48	2000	0.004	2	1	88	72	6	
90CY01	110	1000	—	2	1	177	90	9	

表 5.16-4 CY 系列技术数据（四）

型 号	输出电压 (V)	转速 (r/min)	负载电阻 (Ω)	线性误差 (%) ≤	不对称度 (%) ≤	外形尺寸（mm）			质量 (g)
						总长	外径	轴径	
20CY51	24	8000	10000	1	1	66.5	20	2.5	950
28CY51	54	6000	10000	1	1	99	28	4	
36CY51	100	4000	10000	1	1	99	36	4	
36CY52	48	4000	10000	1	1	99	36	4	
45CY51	97.5	1500	3000	1	1	97.5	45	4	
55CY61	40±4	2000	2000	1	1	119	55	5	
CY361	158	2200	86000	1	1	141	85	10	
$CY362T_1$	180	3000	2700	1	1	161	85	7	

9.2 CYD 系列永磁低速直流测速发电机

CYD 系列永磁低速直流测速发电机技术数据见表 5.16-5～表 5.16-8。

表 5.16-5 CYD 系列技术数据（一）

型号	输出斜率		最大工作转速 (r/min)	最大转速时的电压 (V)	纹波系数（%）			输出电压不对称度（%）	线性误差（%）	每转纹波频率 (Hz/r)	最小负载电阻 (kΩ)	电枢转动惯量 ($\times10^{-5}$ kg·m²)	励磁静摩擦力矩 (N·m)	质量（组装式）(kg)
	V/(rad/s)	V/(r/min)			最高工作转速的1%下运行	最高工作转速的10%下运行	20r/min下运行							
45CYD01		0.01	5000	50	4			1	1	31	2	1.5	0.016	0.36
45CYD02		0.02	2800	56	4			1	1	31	7	1.5	0.016	0.36
55CYD-0.025		0.025	2000	50	4			1	1	33	3	4.41	0.029	0.5
55CYD-0.05		0.05	1000	50	4			1	1	33	13	4.41	0.029	0.5
70CYD-0.25	0.25		1600	41			1	1	1	33	2.5	9.81	0.029	0.87
70CYD-0.5	0.5		800	41			1	1	1	33	6.6	9.81	0.029	0.87
70CYD-1	1		400	41			1	1	1	33	23	9.81	0.029	0.87
130CYD-2.7	2.7		300	84			1	1	1	79	9	196	0.098	2.5
130CYD-6	6		100	62			1	1	1	79	42	196	0.098	2.5
130CYD-11	11		30	34			1	1	1	79	170	196	0.098	2.5
130CYD01		0.2	400	80	2			1	1	79	15	127	0.098	2.6
130CYD02		0.4	200	80	2			1	1	79	54	127	0.098	2.6
130CYD03		0.6	130	78	2.5			1	1	79	34	225	0.147	3.5
130CYD04		0.8	100	80	2.5			1	1	79	66	225	0.147	3.5
160YD-10	10		60	62			1	1	1	85	35	588	0.157	5
160CYD-20	20		30	62			1	1	1	85	150	588	0.157	5
160CYD-30	30		20	62			1	1	1	85	420	588	0.157	5
200CYD01		2.5	40	100		0.85		1	0.75	97	116	1274	0.294	7
200CYD02		3	30	90		0.85		1	0.75	97	165	1274	0.294	7
200CYD03		4	20	80		1.5		1	0.75	97	89	1862	0.343	11
200CYD04		6	15	90		1.5		1	0.75	97	220	1862	0.343	11
250CYD-10	10		75	78				1	1	149	7	3528	0.760	15
250CYD-50	50		15	78				1	1	149	220	3528	0.760	15
300CYD-100	100		8	84			1	1	1	171	—	—	—	

表 5.16-6 CYD 系列技术数据（二）

型号	输出斜率[V/(r/min)]	线性误差（%）	最大工作转速（r/min）	纹波系数（%）	输出电压不对称度（%）	最小负载电阻（kΩ）
130CYD-27	≥0.283	1	100	1	1	12
130CYD-60	≥0.623	1	100	1	1	50
130CYD-602	0.628	1	100	1	1	50
130CYD-110	1.15	1	30	1	1	200
130CYD-272	0.283	1	300	1	1	—
200CYD01	2	0.5	10	0.8	1	—

表 5.16-7 CYD 系列技术数据（三）

型号	输出斜率[V/(r/min)]	纹波系数（%）	最大线性工作转速（r/min）	电枢电阻（Ω）（±12.5%）	输出电压不对称度（%）
70CYD001	0.25	<5	150	1200	—
133CYD001	1.57	≤2	30	2500	≤1
140CYD001	1.047	4	50	2000	—
160CYD001	2.6	1	55	1150	<1
160CYD002	0.9	1	20	280	1
160CYD004	3	1.5	50	1500	1
170CYD002	2.0	1.5	50	2100	1
170CYD003	≥2.0	<1.5	160	500	1
170CYD004	>3	<1.5	30	2300	1
220CYD001	8.0	0.5	19	4200	0.5

表 5.16-8　　CYD 系列技术数据（四）

型　号	输出斜率 [V/（r/min）]	最大工作转速 (r/min)	纹波系数 (%)	线性度 (%)	不对称度 (%)	质量 (kg)	外形尺寸 (mm×mm×mm)	结构型式
J70CYD01	0.25	400	4	0.8	0.8	0.4	φ70×φ16×26	分装式
J80CYD01	0.35	310	3.5	0.8	0.8	0.65	φ80×φ22×31	分装式
80CYD03	0.25	180	4	2	2	0.7	φ80×φ25×40	分装式
130CYD01G	0.6	100	2.5	1	1	1.5	φ130×φ56×36.5	分装式
130CYD02G	0.85	150	2.5	1	1	1.5	φ130×φ56×36.5	分装式
225CYD02	1.675	52	1.0	1	1	4.2	φ225×φ135×45	分装式
225CYD03	3.78	26	1.0	1	1	6.8	φ225×φ135×60	分装式
320CYD01	5.24	20	0.8	0.5	0.5	12	φ320×φ225×70	分装式
320CYD04	6	25	0.8	0.8	0.5	12	φ320×φ225×70	分装式
360CYD01	1.08	500	0.1	0.1	0.1	13	φ360×φ136×80	分装式
360CYD04	17	24	0.5	0.5	0.2	23.5	φ360×φ145×120	分装式
586CYD02	23	33	0.2	0.3	0.2	70	φ568×φ280×131	分装式

9.3　CYB 系列带温度补偿永磁直流测速发电机

CYB 系列带温度补偿永磁直流测速发电机技术数据见表 5.16-9。

表 5.16-9　　CYB 系列技术数据

型　号	最大输出功率 (W)	输出斜率 [V/(kr/min)]	额定电流 (A)	直流电阻 (Ω)	线性误差 (%)	输出电压不对称度 (%)	纹波系数有效值 (%)	最大线性工作转速 (r/min)
75CYB01		60	0.08	110	≤0.5	≤0.5	≤0.5	3000
130CYB	25	100	0.250	39.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	2000
170CYB01	50	100	0.5	5.7	≤0.5	≤0.5	≤0.5	2500
170CYB02	20	100	0.20	50.1	≤0.5	≤1.0	≤0.5	1000
170CYB03	40	150	0.333	10.4	≤0.5	≤0.5	≤0.5	800
192CYB	30	100	0.15	5.4	≤0.5	≤1.0	≤0.5	2000

9.4　无刷直流测速发电机

无刷直流测速发电机技术数据见表 5.16-10。

表 5.16-10　　无刷直流测速发电机技术数据

型　号	输出斜率 [V/(kr/min)]	负载电阻 (kΩ)	最高工作转速 (r/min)	线性误差 (%)	输出电压不对称度 (%)	纹波系数 (%)	WC-01 电源电压 (V)	外形尺寸 (mm×mm)
36CZW-01	3	≥10	4000	≤1	≤1	≤1.5	±15 ±0.5	φ36×47
45CW01	3.3	10	3000	≤0.1	≤0.1	≤1.0	±15	—
90CWY01	20	—	3000	≤1	—	≤1	—	φ90×34
130CW01	20	—	4000	≤1	—	≤1	—	φ130×45

9.5　CX 系列直线测速发电机

CX 系列直线测速发电机技术数据见表 5.16-11。

表 5.16-11　　CX 系列技术数据

型　号	输出斜率[mV/(mm/s)]	纹波系数（%）	输出电压不对称度（%）	直线速度范围（m/s）	直流电阻（kΩ）		工作行程（mm）
J1CX001	1.8～1.9	≤5	—	0～2	0.8	±12.5%	72
12.7CX001	4±10%	<5	—	—	3		>23
16CX001	>6	<3（半峰值）	—	0～2	<1		>60
20CX002	>8	<3	<1	0.005～0.010	<1		±10
20CX004	>4.0	±1.5	—	0～2	2.4		±30
20CX006	>4	<3	—	0～2	2.4		±50

9.6 CYM系列永磁脉冲测速发电机

CYM系列永磁脉冲测速发电机技术数据见表5.16-12。

表5.16-12 CYM系列技术数据

型号	励磁方式	每转脉冲数（脉冲/r）	输出斜率［V/(r/min)］	脉冲周期误差（%）	两相输出相位差（°）
90CYM300-02	永磁	300	≥0.005	0.5	90±20
90CYM300	永磁	300	≥0.025	0.5	单相
130CYM600	永磁	600	≥0.0085	0.5	单相

9.7 CYMD系列电磁式脉冲测速发电机

CYMD系列电磁式脉冲测速发电机技术数据见表5.16-13。

表5.16-13 CYMD系列技术数据

型号	电源电压（V）	每转脉冲数（脉冲/r）	转速范围（r/min）	输出电压（V）
55CYMD50-01	5±5%	50	30～3000	TTL/CMOS兼容
55CYMD200-01	5±5%	200	30～3000	TTL/CMOS兼容
90CYMD1200-01	5±5%	1200	10～3000	TTL/CMOS兼容

9.8 CK系列空心杯转子异步测速发电机

CK系列空心杯转子异步测速发电机技术数据见表5.16-14。

表5.16-14 CK系列技术数据

型号	励磁电压（V）	频率（Hz）	励磁电流（A）	励磁功率（W）	输出斜率［V/(kr/min)］	剩余电压（mV）≤	线性误差（%）≤	线性转速范围（r/min）
20CK4A	26	400	0.045	0.65	0.5	20	0.3	0～3600
20CK4E0.25	36	400	0.12	—	0.25	20	0.5	0～3600
20CK4E0.4	36	400	0.12	—	0.4	25	0.5	0～3600
28CK4A	115	400	0.08	4.5	2.6～2.75	40、60	0.3	0～3600
28CK4B	36	400	0.25	5.0	0.8	20	0.5	0～3600
36CK4A	36	400	0.13	—	0.35～3.5	100	1	0～4000
28CK4B0.8	115	400	0.075	—	0.8	30	0.1	0～3600
28CK4E0.8	36	400	0.14	—	0.8	30	0.5	0～3600
28CK4B2.5	115	400	0.075	—	2.5	60	0.3	0～3600
28CK4B1.5	115	400	0.075	—	1.5	40	0.2	0～3600
36CK4A	115	400	0.08	4.0	2.85～3.0	40、60	0.3	0～3600
36CK4B	36	400	0.25	4.0	1.0	15	0.2	0～3600
36CK4B2	115	400	0.075	—	2	60	0.2	0～3600
36CK4E1	36	400	0.24	—	1	25	0.2	0～3600
36CK4B3	115	400	0.075	—	3	70	0.3	0～3600
36CK4B2	115	400	0.075	—	2	60	0.2	0～3600
45CK5A	110	50	0.11	7.5	3.0	25	0.5	0～1800
45CK4A	115	400	0.23	6.0	3.0	40、60	0.1～0.2	0～3600
45CK4B	36	400	0.29	—	1	40	0.2	—
45CK4B4	115	400	0.1	—	4	8	0.5	0～3600
45CK5C4	110	50	0.045	—	4	50	1	0～1800
45CK5C3	110	50	0.045	—	3	50	0.5	0～1800
45CK4B3	115	400	0.1	—	3	70	0.2	0～3600
45CK5C2	110	50	0.045	—	2	50	0.5	0～1800
55CK5B	110	50	0.1	—	6	60	1	—
55CK5C5	110	50	0.05	—	5	70	1	0～1800
55CK5A	110	50	0.05	2.5	5.0	50	1.0	0～1800

第17章 电机扩大机

1 概述

1.1 分类

在控制系统或伺服机构中，经常需要一种利用小功率信号来控制大功率输出的放大装置，例如由晶体管、晶闸管等电子器件组成的电子放大器、磁放大器和电机扩大机。对各控制绕组输入的电信号在电机内进行励磁合成，经放大并以一定功率输出的直流发电机称为电机扩大机。

电机扩大机根据其工作原理分为交轴磁场电机扩大机（或称交磁电机扩大机）、直轴磁场电机扩大机（或称纵磁电机扩大机）和自差式电机扩大机三类。目前国内外生产和使用最广的是交轴磁场电机扩大机。本章所述电机扩大机仅限于交轴磁场电机扩大机。

1.2 特点

电机扩大机具有下列优点：

1）过载能力大。电机扩大机的瞬时过载功率可达到额定值的2倍，瞬时过电压和过电流可分别达到额定值的1.5倍和2.5倍。

2）功率放大系数大。电机扩大机的功率放大系数可达50000。由于功率放大系数大，故需要输入的控制信号小，一般要求控制绕组的输入功率为0.5～1W。

3）多参量控制。电机扩大机一般设有2～4个控制绕组，每个控制绕组都能独立地对输出功率进行控制，故能进行多参量控制。

4）输出电压和电流的极性容易变换。改变输入控制绕组电信号的极性即可改变输出电压和电流的极性。

此外，电机扩大机的输出功率是由驱动它的机械功率转换而来的，只需有原动机即可得到可控的电功率输出，因此适宜野外装备、舰船、战车等作为功率放大装置和电压可调的直流发电机使用。

2 工作原理、结构和工作特性

2.1 工作原理

交轴磁场电机扩大机实质上是以交轴电枢反应磁通作为主磁通的具有共磁系统、两级放大的他励直流发电机。工作时，电机扩大机的转子由电动机或其他原动机拖动。

如图5.17-1所示，当控制绕组W_K通以控制电流I_k时，即产生直轴磁通Φ_K，电枢转动后，在电枢绕组中感应电动势，因此在q-q电刷两端产生电动势E_q，若接上负载即可输出功率。上述情况与他励直流发电机扩大机的工作原理相同。控制绕组的功用相当于他励直流发电机的励磁绕组。此时电机扩大机的输出功率与控制绕组输入功率之比（功率放大系数）为20～100倍，成为第1级放大。由于功率放大系数较小，不能满足一般控制系统的要求，故必须进行第2级放大。

如图5.17-2所示，在电刷q-q端接上负载后，电枢绕组即有电流通过，产生电枢反应磁通（交轴磁通）Φ_q，电枢绕组切割Φ_q，在电刷d-d间产生感应电动势E_d，E_d的大小与Φ_q成正比，即与q-q的负载电流成正比。若将q-q电刷短路，由于电枢绕组的电阻很小，故Φ_q变得很大，导致电刷d-d间能输出很大的功率，完成了第2级放大，使电机扩大机的功率放大系数达到500～50000。此时电机扩大机成为无补偿的交轴磁场电机扩大机。

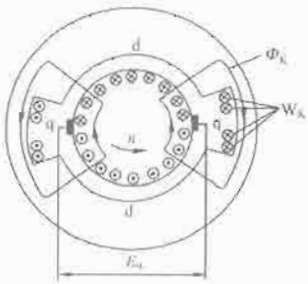


图5.17-1 电机扩大机的1级放大

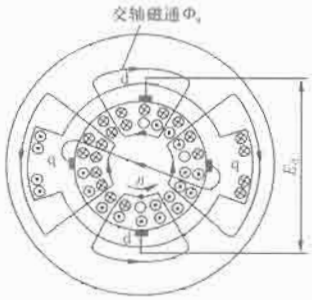


图5.17-2 无补偿交轴磁场电机扩大机

电机扩大机接上负载后，电枢绕组流过的电流的方向如图5.17-3所示（注：电枢上只有1套绕组，但为了分清由Φ_K和Φ_q产生的电流方向，画成内、外两圈绕组）。由负载电流I_d产生的纵轴电枢反应磁通Φ_{ad}与控制磁通Φ_K的方向相反，削弱了控制磁通Φ_K。随着负载电流I_d增大，Φ_{ad}增大，且$\Phi_{ad} \gg \Phi_K$，导致E_q、Φ_q和E_d建立不起来。为了消除Φ_{ad}的影响，可在电机定子上装设一套补偿绕组W_{bs}。此绕组与负载串联，所产生的磁通Φ_{bs}与Φ_K的方向一致。随着I_d的增大，Φ_{bs}也增大，故能有效地消除Φ_{ad}的影响。补偿绕组与补偿调节电阻（由固定电阻和可调电阻串联而成）并联。调整补偿调节电阻的阻值即可改变补偿绕组的补偿程度。因电枢绕组是沿转子圆周分布的，为了更好地抵消Φ_{ad}，补偿绕组采用不均匀分布绕组安放在定子铁心的小槽和中槽中。

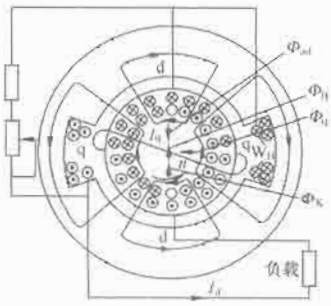


图5.17-3 补偿绕组的作用

为了改善电机扩大机的换向，在定子直轴上设有换向极，极上安放换向绕组 W_H 并与直轴电路串联。因电机交轴方向的大槽中绕组较多，不便装设换向极和换向绕组，故在直轴的大槽中设置交轴助磁绕组 W_J，与两交轴电刷串接，使其产生的磁通与 Φ_q 方向相同，这样即可在保持 Φ_q 不变的情况下减小交轴电流 I_q，以改善交轴换向。

为了削弱由磁滞效应引起的剩磁电压对电机扩大机特性的影响，通常在定子铁心的轭部绕有交流去磁绕组 W_Q。当电机扩大机运行时，绕组 W_Q 与低压 2～5V 交流电相接。换向绕组 W_H、交轴助磁绕组 W_J 和交流去磁绕组 W_Q 在定子上的布置如图 5.17-4 所示。图 5.17-5 为交轴磁场电机扩大机的工作原理图。

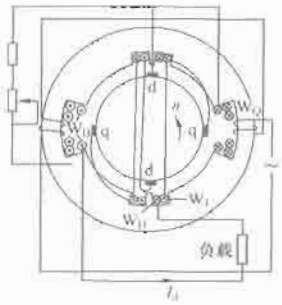


图 5.17-4 换向绕组、交轴助磁绕组和交流去磁绕组布置图

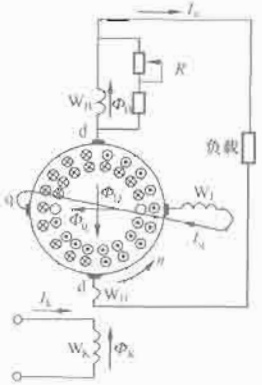


图 5.17-5 交轴磁场电机扩大机工作原理图

2.2 结构

电机扩大机有两种基本结构型式：一种是单独式，不带拖动电动机；另一种是共轴式，将拖动电动机的转子与电机扩大机的电枢共轴。拖动用的电动机可用三相感应电动机或直流电动机。

电机扩大机的结构与直流电机的相似，但定子铁心由于要将控制绕组、补偿绕组、换向绕组、交轴助磁绕组和交流去磁绕组安放在适当的位置上，故定子冲片具有不同形状的大、中、小槽，如图 5.17-6 所示。这与一般直流电机不一样。此外，电机扩大机的刷杆对数比直流电机多 1 倍，直轴电刷与交轴电刷互差 90°电角度。

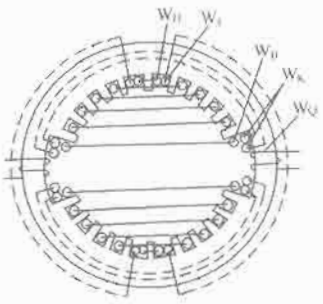


图 5.17-6 定子冲片形状及各绕组布置

电机扩大机根据输出功率的大小，极对数为 1 或 2，输出功率小于 25kW 的采用 1 对极，大于 25kW 的采用 2 对极。

2.3 工作特性

(1) 空载特性

空载特性是指电机扩大机在额定转速下，空载电动势 E_{d0} 与控制磁动势 F_K 之间的关系。在理想情况下，它是一条通过 O 点的直线，但实际上，由于磁性材料的磁饱和及磁滞的影响，会产生畸变，如图 5.17-7 所示。空载特性曲线的两端畸变较严重，中间部分线性度较好。这是因为当 F_K 不大时，受到剩磁电压、磁性材料的磁化曲线非线性和电刷接触压降等因素影响所致；当 F_K 很大时，铁心达到磁饱和，磁通 Φ_K 不再与 F_K 成正比，导致 E_{d0} 不能与 F_K 成正比。系统要求空载特性的线性度高，即空载特性曲线的直线部分要长，以使输出电压随控制信号变化的失真小。

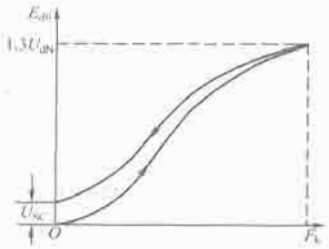


图 5.17-7 空载特性与剩磁电压

(2) 剩磁电压

剩磁电压是指电机扩大机在额定转速下运行，控制电流逐渐减小到零时的输出电压。剩磁电压是按下列方法测定的：电机扩大机在额定转速下空载运转，将控制电流从零开始逐渐增加，使空载输出电压从零升至额定值的 1.3 倍，然后将控制电流逐渐减小，减到零时的输出电压 U_{SC} 即为剩磁电压。剩磁电压的大小与电机扩大机是否有交流去磁绕组有关，有交流去磁绕组时，剩磁电压不大于额定电压的 5%，不设交流去磁绕组且不采用任何去磁措施时，剩磁电压有可能达到额定输出电压的 15%。

剩磁电压对电机扩大机的性能将产生不利影响，在小控制信号输入时，输入信号与输出电压的线性关系会受到破坏。剩磁电压对控制系统的影响是：在没有控制信号输入的情况下，若剩磁电压较高，可能使下一级的执行器产生误动作。

除了采用交流去磁绕组接上交流电源减小剩磁电压外，还可采用电压负反馈方法。图 5.17-8 为电压负反馈线路。可选用电机扩大机中参数适当的控制绕组作为反馈绕组，将反馈绕组与电阻 R_F 串联后跨接于电机扩大机的输出端，根据反馈程度和反馈绕组的参数来选择 R_F 的值，使反馈绕组在控制磁动势 F_K 为零时所产生的反馈磁动势 F_D 与剩磁的方向相反，以降低剩磁电压。但这种方法在电机扩大机正常运转时会降低其功率放大系数。

电机扩大机在运行时，若经常单方向过载使用，极端强励磁或者运行中突然发生短路都会使剩磁电压急剧增大，有时甚至增大到额定输出电压的 50%以上，严重影响运行。通常可用下述方法削弱剩磁电压：电机扩大机以额定转速空载运行，在剩磁小的一方加 1～2 倍的额定控制电流，然后切断电动机的电源，使电机扩大机转速逐渐下降，与此同时，将控制电流逐渐增大到额定值的 3～5 倍，直至电机扩大机停止转动 5～10s 后再切断控制电流，一般重复数次即可使剩磁电压降至允许范围内；若仍未能矫正时，如图 5.17-9 所示，将电机扩大机所有与外界的电连接都切断，把与补偿绕组并联的补偿调节电阻支路断开，然后空载运转，用一根截面大于 6mm² 的导线，一端接于交轴电刷上，将电机扩大机停转并同时将导线的另一端与直

轴电刷相碰，即有尖叫声和火花产生（如无上述现象，则碰另一直轴电刷），经过一、二次后，即可消除单向剩磁。注意操作时运作要快速，因为交、直轴电刷短路时火花很大，时间过长可能将换向器烧坏。

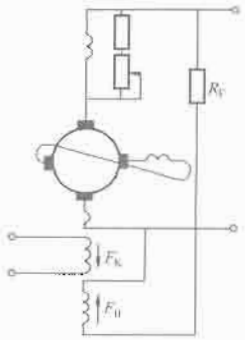


图 5.17-8　用电压负反馈降低剩磁电压

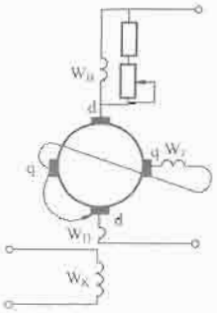


图 5.17-9　消除剩磁电压接线法

（3）外特性

电机扩大机的外特性是指控制电流 I_k 为常数时，输出电压 U_d 与负载电流 I_d 的关系。对外特性的基本要求是：在额定电压变化率为 30%时，控制电流自零到额定值范围内，所有外特性曲线都是下降的，如图 5.17-10 所示。

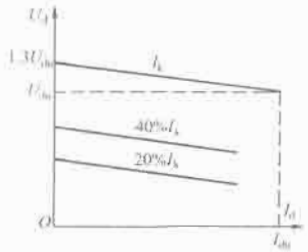


图 5.17-10　外特性曲线

外特性曲线的形状与补偿绕组所产生的补偿磁动势 F_B 有密切关系。若 F_B 与直轴电枢反应磁动势 F_{ad} 大小相等、方向相反，则称为全补偿，输出电压为

$$U_d = E_d - I_d r_K$$

式中，U_d 为输出电压，V；E_d 为直轴电动势，V；I_d 为直轴电流，A；r_K 为电枢电阻，Ω。

在此情况下，电机扩大机的外特性与普通他励直流发电机相同。随着 I_d 的增大，$I_d r_K$ 增大，故 U_d 随 I_d 的增大而略为下降，如图 5.17-11 所示曲线 1。若 $F_B < F_{ad}$，则称为欠补偿。此时直轴电枢反应磁动势 F_{ad} 起去磁作用；随着 I_d 的增大，去磁作用越大，U_d 下降越快，故在欠补偿状态下，外特性曲线下垂，如图 5.17-11 所示曲线 2。下垂斜率取决于欠补偿程度，欠补偿程度越大，下垂斜率越大。当 $F_B > F_{ad}$ 时为过补偿，F_B 起助磁作用，F_B 随 I_d 增大，导致 E_d 增大，当 E_d 的增大值大于 $I_d r_K$ 后，外特性曲线上翘，如图 5.17-11 所示的曲线 3。

外特性是电机扩大机的重要技术指标之一。外特性上翘或严重下垂对运行都不利。上翘严重时，会产生自励或振荡，使电机无法工作；严重下垂时，在小控制信号运行条件下，使拖动系统的机械特性变软。

调整补偿绕组的补偿程度可以改变电机扩大机的外特性。图 5.17-12 中，与补偿绕组并联的电阻支路是由电阻

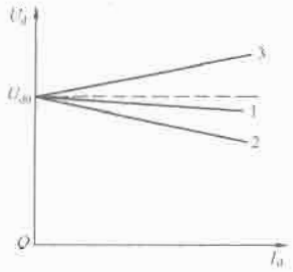


图 5.17-11　不同补偿状态下的外特性

R_D 和 R_r 串联而成的。R_D 是固定电阻，用铜线制成，R_r 是可变电阻，用铬镍线制造。改变 R_r 的值即可改变流过补偿绕组的电流，从而改变补偿绕组的补偿程度。当 R_r 增大时，补偿程度增大，反之亦然。当电阻支路断开时，则电机扩大机呈过补偿状态，补偿程度一般为 102%～105%。为了使电机扩大机能稳定运行，通常调整到 95%～97%欠补偿状态。出厂时已将电压变化率和补偿程度调整好，用户不必重新调整。

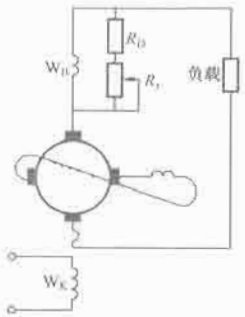


图 5.17-12　补偿程度的调整

（4）功率放大系数

功率放大系数是指当电机扩大机的额定电压变化率为 30%时，额定负载时的输出功率 P_H 与控制绕组额定输入功率 P_{KH} 之比，即

$$K_P = P_H / P_{KH}$$

功率放大系数是电机扩大机的主要技术指标。功率放大系数大，意味着能以较小的控制绕组输入功率来控制较大的输出功率，故要求功率放大系数尽可能大。我国生产的电机放大机的功率放大系数一般在 500～50000 之间。

（5）过载能力

电机扩大机在运行过程中，会受到前级控制回路或负载的干扰而出现瞬时过载现象。瞬时过载包括功率过载、电压过载和电流过载。过载能力是指允许的实际输出值与额定值之比，以额定值的倍数来表示。电机扩大机只允许瞬时过载，过载时间不大于 3s，而且每小时的过载次数不得超过 6 次，时间间隔要均匀。各项过载能力见表 5.17-1。

表 5.17-1　　过载能力

过载项目	过载倍数
功率过载	2
电流过载	3.5
电压过载	1.5

(6) 时间常数

时间常数代表电机扩大机对控制信号的响应能力，时间常数越小，表示电机扩大机的响应性越快。电机扩大机的时间常数 τ 由控制绕组的时间常数 τ_K 和交轴回路的时间常数 τ_q 组成，即

$$\tau = \tau_K + \tau_q$$

式中，$\tau_K = L_K/R_K$，一般为 0.03～0.06s，其中 L_K 为控制绕组电感，H；R_K 为控制绕组电阻，Ω；$\tau_q = L_q/R_q$，一般为 0.05～0.1s（其中 L_q 为交轴回路电感，H；R_q 为交轴回路总电阻，包括电枢电阻、交轴励磁绕组电阻、交轴电刷接触电阻和换向去磁及铁损耗去磁的等效电阻，Ω）。

通常 $\tau_q > \tau_K$。由于控制绕组所接的前级放大器有较大的电阻或者在控制回路上串接电阻，实际的控制回路时间常数要比上述的 τ_K 小，因此，电机扩大机的快速响应能力主要取决于 τ_q。

(7) 传递函数

电机扩大机的传递函数可用下式表示

$$\frac{e_d}{U_K} = \frac{K_u}{(\tau_K p + 1)(\tau_q p + 1)}$$

式中，e_d 为瞬态输出电动势，V；U_K 为控制电压，V；K_u 为空载时电压放大系数；p 为拉普拉斯算符。

3 技术标准、调整及试验

3.1 技术标准

现有电机扩大机的技术标准是中华人民共和国国家军用标准 GJB 1781—1993《电机扩大机通用规范》。本标准对军事技术装备用电机扩大机的适用范围、要求（包括安全要求、环境要求）、质量保证规定以及包装运输和贮存等作了规定。

3.2 电刷调整

电刷接触的状况和电刷相对于中性线的位置对电机扩大机具有重要的意义。电刷接触不良可能引起电机扩大机参数的显著变化。电刷装置的结构要保证电刷的接触稳定。

直轴和交轴电刷通常放置在能摇移的同一刷杆座上，并可靠地固定在端盖上。经常采用直接压紧在换向器端盖上的所谓“管”型刷握。用这样的刷握，维护电刷方便；缺点是刷握内弹簧压力无法调整，随着电刷的磨损，电刷上所受的压力要发生变化。

在电机扩大机中，保证被置于同一刷杆上的所有电刷受到均匀的压力，较之其他电机中更为重要。不均匀的压力可以引起不均匀的电流分布，因而引起个别的电刷过载和引起火花。这种情况本身就可以引起电刷的接触电阻变化以及电机扩大机参数的变化。

当采用电化石墨电刷时，电刷上的单位压力大致应为 2.94×10^{-2}Pa。

刷握中电刷的活动空隙同样也对电刷接触的稳定性产生影响，因此要求电刷与刷握之间的空隙很小（通常约 0.1mm）。同时建议装设倾斜型的电刷及刷握，保证电刷可靠地紧贴在换向器上。

对换向器的表面质量和跳动应有较高的要求，特别是高速电机，当电枢转速为 3000r/min 以下时，通常允许换向器的跳动不大于 0.05mm。电机扩大机的电枢要进行精确的动平衡。

应特别注意对电刷的研磨及抛光。其表面粗糙度很大程度上决定了电机扩大机特性的稳定性。

预先在和换向器相同直径的磨石上进行电刷的研磨。建议将电刷装在端盖带有刷杆座上的刷握中进行研磨，然后再直接在电机扩大机内将这些电刷抛光，抛光面大致为电刷整个工作面的 80%时为止，抛光持续时间通常不少于 24h，然后校正电刷放在中性线位置上，重新进行抛光约 2h。

电刷及刷握通常被打上标记，以便在检查电刷、装配或拆卸电机扩大机时精确地固定电刷。

电机扩大机的电刷应放在中性线位置上，通常是用感应法来进行的。此时，交轴磁场电机扩大机中的短路回路被断开，而直轴电刷被升起。在电枢静止下，当接通或断开任一控制绕组中的电流时，根据接在交轴电刷上的零位检流计的最小偏转来决定电刷的位置，如图 5.17-13 所示。为了有较高的准确度，应在电枢相对于定子有好几个位置的情况下来决定电刷的位置。控制电流的大小应接近于额定值。

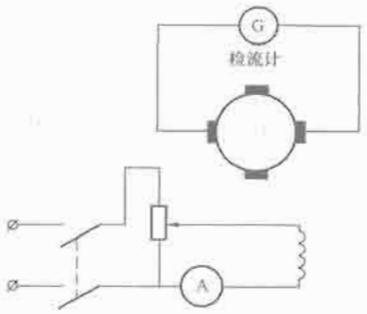


图 5.17-13 将交轴磁场电机扩大机的电刷安装在中性线上的线路图

当电机扩大机运转时，需要经常监视电刷装置及换向器的状况。如果由于电机运转，在换向器上出现灼痕，则必须用浸有纯酒精或纯航空汽油的擦布把它擦去。当灼痕擦不掉时，允许用细玻璃砂纸把它除掉。

运转使用中需要更换电刷时，应根据上述方法进行研磨及磨光，而且必须监视电刷上的压力。

3.3 试验

和普通电机一样，电机扩大机的试验分为检查试验和型式试验。型式试验通常每年对某几种规格电机扩大机进行一二次，或者当结构材料及制造工艺的改变会影响到电机扩大机的参数及工作可靠性时进行。

在进行试验以前，应该仔细地将电刷在换向器上研磨及抛光，并将电刷校正在中性线的位置上。试验时必须注意到电刷的接触。在每次安装电刷以后或者在电刷灼伤时，应重新将电刷在换向器上研磨。

试验时，必须使电枢的转速实际上保持不变。由于转速变慢或者短时的转速变化都可以造成试验结果的变化。建议采用异步电动机作为拖动装置，因为异步电动机在供电电压及频率不变时，转速的变化不大。

所有的试验通常是在一个控制绕组内由独立的直流电源供电下进行，然后在检查试验结束时，再检查其余的绕组。

4 选用原则

1) 根据额定功率、额定电压和额定电流选择电机扩大机，并需留有 10%～20%的裕度。若负载是周期性变化的，

应从负载图计算出其功率、电压和电流的等效值。选用电机扩大机组时，应注意拖动电动机的电压、频率是否与使用现场的电源相符。

2）电机扩大机一般备有 2～4 个控制绕组，且绕组的匝数、电阻、额定控制电流和长期允许电流各有不同，应根据实际使用情况选择绕组的个数和参数。当前级为推挽放大或差动放大时，选用的两个控制绕组要参数相同。控制绕组的参数应与前级放大器的输出参数匹配。作为电压反馈绕组使用时，应选用高电阻的控制绕组，作为电流反馈绕组使用时，应选用低电阻的控制绕组。

3）若系统对电机扩大机有过载要求时，其功率、电压、电流的过载范围应不超过过载倍数及允许的过载时间，并应留有裕量。

4）电机扩大机在控制系统使用时，常选用时间常数小的电机扩大机，以提高系统的快速响应能力。但电机扩大机的时间常数 τ 与功率放大系数 K_p 是相互制约的，即降低时间常数的同时会降低功率放大系数，故应综合权衡，一般以电机扩大机的品质因数 Q 来评价（$Q=K_p/\tau$），Q 值越高，表示电机扩大机的综合特性越好。

5）剩磁电压对系统的灵敏度影响很大。系统要求剩磁电压应小于最低控制电压，并且有一定裕量，否则需采用交流去磁或负反馈等措施以削弱剩磁电压。

6）若选用单独式电机扩大机，需要自配拖动电动机时，应注意其转速和功率是否符合电机扩大机的要求。

5　应用实例

（1）在位置伺服系统中的应用

图 5.17-14 是包含有电机扩大机的位置伺服系统。在此系统中，电机扩大机作为放大元件使用。图中，当控制式自整角发送机 CX 和控制式自整角变压器 CT 处于协调位置时，CT 转子没有信号输出；若 CX 转子转过 θ 角度，则 CT 转子绕组端产生与 θ 角成正弦关系的电压 $U\sin\theta$。此电压作为位置误差信号输入相敏检波器并经过放大输至电机扩大机的控制绕组，产生控制磁通。由于电机扩大机是以恒定速度转动的，因此电机扩大机的直轴有大功率输出，并输入到他励直流电动机的电枢（他励直流电动机的励磁绕组由恒定电压励磁），电动机即转动，经过齿轮减速带动负载和 CT 的转子，直至转子转过 θ 角度后，CX 与 CT 进入新的协调位置。CT 转子绕组的端电压为零，导致电机扩大机控制电压为零，电机扩大机没有功率输出，直流电动机立即停止转动。火炮控制就是采用这种系统。其中 CX 与雷达转轴连接，负载为火炮的旋转轴并与 CT 连接。当雷达捕捉到飞行目标后，跟踪飞行目标，按照上述工作原理，火炮亦跟踪飞行目标，进行射击。

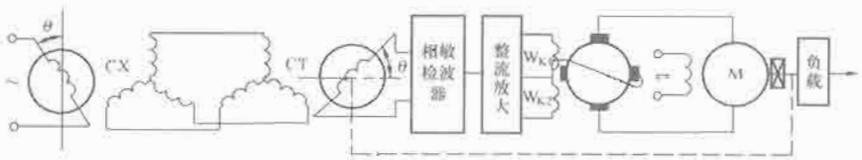


图 5.17-14　位置伺服系统

（2）在自动调速系统中的应用

图 5.17-15 是电机扩大机在自动调速系统中应用的原理图。图中的他励直流电动机 M 的电枢由电机扩大机供电，励磁绕组则由恒定电压励磁。直流电动机除带动负载外还带动直流测速发电机 G（由另一恒定直流电压励磁）。他励直流测速发电机 G 的输出电压与转速成正比。此电压经调节后输入到电机扩大机的控制绕组 W_{K2}，产生磁动势 F_{K2}，与控制绕组 W_{K1} 所产生的磁动势 F_{K1} 的极性相反。F_{K1} 和 F_{K2} 合成的磁动势 F 成为电机扩大机的控制磁动势。电机扩大机电枢即产生与控制磁动势成比例的电功率并输入他励直流电动机 M，使他励直流电动机 M 以恒定速度旋转。当由于负载变化等原因使他励直流电动机 M 的转速下降（或上升）时，则测速发电机 G 的输出电压相应地下降（或上升），使合成磁动势 F 增大（或减小），结果使电机扩大机的输出功率上升（或下降），最终使他励直流电动机 M 的转速上升（或下降），自动调整到原先的转速。

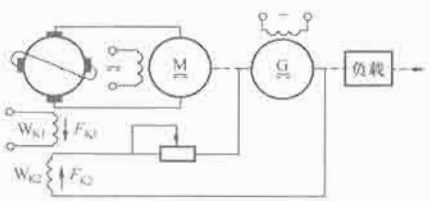


图 5.17-15　自动调速系统原理图

（3）在调压系统中的应用

图 5.17-16 为直流发电机自动调压系统原理图。直流发电机 G 的励磁绕组由电机扩大机供电。直流发电机 G 的输出端通过分压电阻 R_1 和调节电阻 R_2 向电机扩大机的控制绕组 W_{K2} 供电，产生磁动势 F_{K2}。控制绕组 W_{K1} 由直流电压 U_K 励磁，产生磁动势 F_{K1}，F_{K1} 与 F_{K2} 的极性相反。它们的合成磁动势 F 即为电机扩大机的控制磁动势，控制电机扩大机的输出功率，从而控制直流发电机 G 的输出电压 U_F。若由于负载变化等原因使发电机 G 的输出电压 U_F 下降（或上升），则 F_{K2} 随之下降（或上升），使合成磁动势 F 上升（或下降），导致电机扩大机的输出功率增大（或减小），直流发电机 G 的励磁绕组磁动势增大（或减小），最终使发电机 G 输出电压上升（或下降），恢复到原先的水平。调节 U_K 的大小即可改变直流发电机 G 的输出电压 U_F。

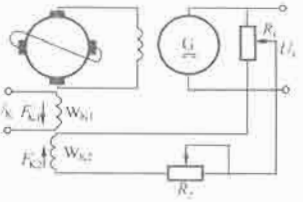


图 5.17-16　直流发电机调压系统原理图

6 典型产品技术数据

(1) ZKK 系列电机扩大机主要技术数据

ZKK 系列电机扩大机主要技术数据见表 5.17-2。

表 5.17-2 ZKK 系列电机扩大机主要技术数据

型号	额定功率 (kW)	额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定转速 (r/min)	机组效率 (%)	驱动电动机绕组联结方式	驱动电动机额定电压 (V)	驱动电动机额定电流 (A)	驱动电动机功率因数	起动电流/额定电流
ZKK3J/01	0.14	80	1.75	2900	44.5	△/Y	220/380	1.04/0.6	0.78	7
ZKK3J/02	0.2	115	1.74	2900	42.5	△/Y	220/380	1.54/0.89	0.78	7
ZKK3Z/01	0.3	115	2.61	4500	42.2	并励	110	6.45		
ZKK3Z/02	0.3	115	2.61	4500	42.2	并励	220	3.23		
ZKK5J/01	0.37	85	4.35	2900	50	△/Y	220/380	2.5/1.45	0.78	7
ZKK5J/03	0.5	115	4.35	2900	53.8	△/Y	220/380	3.1/1.79	0.80	7
ZKK5J/04	0.5	60	8.3	2850	53.8	△/Y		3.1/1.70	0.79	
ZKK5Z/01	0.35	115	3.04	3000	50	并励	220	3.18		
ZKK5Z/02	0.7	115	6.08	5000	53.8	并励	110	11.8		
ZKK5Z/03	0.7	115	6.08	5000	53.8	并励	220	5.9		
ZKK12J/01	1.0	115	8.7	2900	59.5	△/Y	220/380	5.4/8.1	0.82	7
ZKK12J/02	1.0	115	8.7	2900	59.5	△/Y	220/380	5.4/8.1	0.82	7
ZKK12J/03	1.2	115	10.4	2900	63	△/Y	220/380	6.03/3.5	0.83	7
ZKK12J/04	1.0	60	16.7	2900	59.5	△/Y	220/380	5.4/3.1	0.82	
ZKK12Z/01	1.0	115	8.7	4000	55.5	并励	220	8.2		
ZKK12Z/02	1.3	115	11.3	4000	59	并励	110	20		
ZKK12Z/03	1.3	115	11.3	4000	59	并励	220	10		
ZKK12Z/04	1.5	230	6.52	4000	58.3	并励	220	11.7		
ZKK25/01	1.0	115	8.7	1450	68					
ZKK25/02	1.0	230	4.35	1450	68					
ZKK25/03	1.2	115	10.4	1450	68					
ZKK25/04	1.2	230	5.2	1450	68					
ZKK25/05	2.0	115	17.4	2900	74					
ZKK25/06	2.0	230	8.7	2900	74					
ZKK25/07	2.5	115	21.7	2900	74					
ZKK25/08	2.5	230	10.9	2900	74					
ZKK50/01	2.0	115	17.4	1450	78					
ZKK50/02	2.0	230	8.7	1450	78					
ZKK50/03	2.2	115	19.1	1450	78					
ZKK50/04	2.2	230	9.6	1450	78					
ZKK50/05	4.0	115	17.4	2900	80					
ZKK50/06	4.5	230	19.6	2900	80					
ZKK70/01	3.0	115	26.1	1450	78					
ZKK70/02	3.0	230	13.0	1450	78					
ZKK70/03	3.5	115	30.4	1450	78					
ZKK70/04	3.5	230	15.2	1450	78					
ZKK70/05	6.0	115	26.1	2900	80					
ZKK70/06	7.0	230	30.4	2900	80					
ZKK100/01	4.2	115	36.1	1450	81					
ZKK100/02	4.2	230	18.3	1450	81					
ZKK100/03	5.0	115	43.5	1450	81					
ZKK100/04	5.0	230	21.7	1450	81					

续表

型号	额定功率（kW）	额定电压（V）	额定电流（A）	额定转速（r/min）	机组效率（%）	驱动电动机绕组联结方式	驱动电动机额定电压（V）	驱动电动机额定电流（A）	驱动电动机功率因数	起动电流/额定电流
ZKK100/05	8.5	230	37	2900	84					
ZKK100/06	10	230	43.5	2900	84					
ZKK110/01	9	230	39	1450	82					
ZKK110/02	11	230	47.8	1450	82					
ZKK200/01	16	400	40	1450	83					
ZKK200/02	16	230	69.6	1450	83					
ZKK200/03	20	230	87	1450	83					
ZKK250/01	20	230	87	1450	85					
ZKK250/02	25	230	109	1450	85					
ZKK330	33	330	109	1450	87					
ZKK500	50	460	109	1450	88					
ZKK2000Z	2000	110	18.2	5200						

（2）专用电机扩大机主要技术数据

专用电机扩大机主要技术数据见表 5.17-3。

（3）ZKK-2000Z 型电机扩大机技术数据

ZKK-2000Z 型电机扩大机技术数据见表 5.17-4。

表 5.17-3　　专用电机扩大机主要技术数据

型号	额定功率（kW）	额定电压（V）	额定电流（A）	额定转速（r/min）	工作制定额	驱动电动机额定输入参数	附注
ZKK5ZG	1.7	110	15.4	6000	S2，10min	直流电动机：26V，130A	—
KZ170	1.7	115	14.8	5500	S2，10min	直流电动机：26V，130A	—
KZ200	2.0	115	17.4	5000	S2，10min	直流电动机：26V，146A	扩大机与驱动
KYO200	2.0	230	8.7	2900	S2，60min	三相笼型异步电动机：380/220V，6.2/10.7A	—
KYO400	4.0	230	17.4	2900	S2，60min	三相笼型异步电动机：380/220V，11.3/19.5A	与电动机共机壳
KY1000	8.5	230	37	2930	S1	三相笼型异步电动机：380V，12A	—
ZKG-200/01	2.0	115	17.4	5000	S2，30min	—	—
ZKG-200/02	2.0	115	17.4	5000	S2，30min	—	—
ZKG-400	4.0	230	17.4	4000	S2，60min	—	两种扩大机共机壳，单轴伸
ZKG-700	7.0	230	30.4	4000	S2，60min	—	两种扩大机共机壳，单轴伸
ZKG-600	6.0	230	26.1	4000	S2，60min	—	—
ZKG-1000	10	230	43.5	4000	S2，60min	—	—
KK600	6.0	230	26.1	2930	S1	—	一级放大、快速响应
ZKK600	3.0	230	11.1	3300	S2，60min	—	—
ZKK1200	12	230	32.4	3300	S2，60min	—	—

表 5.17-4　　ZKK-2000Z 型电机扩大机技术数据

型号	功率（W）	电枢电压（V）	励磁电流（A）	励磁电压（V）	控制绕组数	控制电流（A）	转速（r/min）	电枢电压（V）	电枢电流（A）	励磁电压（V）	励磁电流（A）	转速（r/min）	外形尺寸（mm）			质量（kg）
													长	宽	高	
ZKK-2000Z	2000	110	18.2	28	3	0.12	5200	28	<136	28	6	5200	623	200	270	66

第18章 超声波电机

1 概述

在电子信息技术及控制技术迅速发展的今天，作为系统中必不可少的实现驱动和控制的微电机，在很大程度上决定了伺服系统整体性能的优劣。为适应灵活性、快速性、简便性控制的要求，多年来国内外科技界和工业界一直致力于研究各种新型微电机。其中，性能卓越的超声波电机利用压电陶瓷逆压电效应产生超声振动，并将这种振动通过摩擦耦合来直接驱动转子或滑块运动，它作为一种直接驱动电机，从20世纪80年代以来备受各国科研工作者的青睐，已成为当前机电控制领域的一个研究热点。

1.1 发展趋势

(1) 国外研究现状

由于超声波电机具有低速大转矩、无电磁干扰、动作响应快、无输入自锁等卓越特性，在非连续运动、精密控制等领域要比传统的电磁电机性能优越得多，因而相关的应用开发一直受到业界的重视。日本的超声波电机及其驱动控制技术的产业化应用处于世界领先地位。它掌握着世界上大多数的超声波电机制造及控制技术的发明专利，几乎所有的知名大学和研究院都在进行研究。如东京大学、东京工业大学等至少有一个超声波电机研究小组，或进行理论分析研究，或进行新原理、新结构超声波电机的研究，或进行控制专用芯片的集成。参与研发、商业制造及销售的大公司更多，近10多年，日本超声波电机已进入商业应用阶段。如环形行波型超声波电机、柱体棒形行波超声波电机已商业化生产和销售，表5.18-1是超声波电机的应用场合及需求。

表5.18-1 超声波电机的应用场合及需求

应用领域	应用数量（万台）
光学仪器（照相机等）	500
轿车（座椅等）	20
精密仪器（手表等）	30
航空设备（图像处理等）	1
产业机器（XY定位仪、机器人等）	20
住宅设备（百叶窗、窗帘等）	2

由于日本在超声波电机及其驱动控制领域所获得的极大成功和较高的商业利润，美国、英国、法国、德国等不甘落后，各自在相关的超声波电机及其驱动控制、新结构、新原理、新应用领域等方面取得了一定的研究成果。

美国的密苏里大学主要研究电机工作时定子和转子之间的接触模型以及接触力对电机寿命的影响，同NASA合作研究行波超声波电机加工工艺及控制技术。NASA、MIT共同研究开发了用于火星探测器操作臂关节驱动的大力矩超声波电机。英国的伯明翰大学主要研究基于“谐波齿”理论的超声波电机，以及实现电机高精度的定位控制。德国帕德博恩大学主要研究超声波电机振动分析和动态接触等，如线性、旋转行波电机的振动分析和动态接触问题，电机振动稳定性，电机的运动控制，复合材料的动态特性以及结构的阻抗匹配等。法国某研究所对所研制的线性电机定子的切线和法线位移、法线力因子做了系统的测试和评估。另外，还有许多国家陆续参与到超声波电机及其驱动控制技术的研究中来。

(2) 国内研究现状

我国超声波电机及其驱动控制技术的研究起步虽晚，但发展迅速。1986～1990年间，四川压电与声光技术研究所将日本有关超声波电机的研究情况陆续介绍到了国内。

进入20世纪90年代以来，国内的超声波电机试制工作逐步进入正轨，一些高等学校和科研院所，对典型的几种超声波电机的运行原理、数学建模、仿真计算、样机制作及驱动技术等进行了研究，并获得了一批研究成果。

东南大学研制的系列行波型、步进型和柱状夹心式超声波电机样机水平已接近实用要求，定子直径为100mm的均压行波超声波电机（最大转矩达到了3.5N·m）及超声波电机多功能驱动控制装置分别获得了国家专利。清华大学则研究了目前国内直径最小（1mm）的超声波电机，有望在心脏的微循环系统中应用，并对环形中空用超声波电机的样机进行了优化设计。浙江大学研制了大力矩（堵转力矩接近10N·m）和高重复定位精度（0.025°）的纵扭复合型超声波电机。南京航空航天大学研制出多种结构型式的样机，如环形行波型超声波电机，双面齿型、圆板型、驻波型超声波电机。华中科技大学研制了大扭矩行波型超声波电机，并对转子尺寸和形状对输出功率和输出转矩的影响作了深入研究。国内所研制的超声波电机已接近实用要求，并可望逐步实现批量生产，有些拟用于军事装置中，有些超声波电机的产业化应用前景被国内大型企业和传统电机生产厂家看好。

1.2 分类

近20多年，出现了各种原理和结构的超声波电机，但其分类一直比较模糊，根据压电激励方式、结构型式、电机功能、应用场合等，可以将超声波电机分成不同的种类。以下从驱动方式、椭圆运动方式和定转子接触状态等进行分类。

1) 机械振动获取方式。按照机械振动获取方式的不同，超声波电机可分为非谐振驱动和谐振驱动两种类型，见表5.18-2。

表5.18-2 超声波电机按机械振动获取方式分类

非谐振驱动超声波电机		谐振驱动超声波电机				
蠕动电机	惯量电机	行波电机	驻波电机	模态转换电机	多模电机	混合换能器电机

2）驱动方式。按照驱动方式的不同，超声波电机可分为行波型、驻波型和电致伸缩公转子型，见表 5.18-3。

表 5.18-3　超声波电机按驱动方式分类

方　式	振动模式	具体实例
行波方式	同型简并模式	环形、圆盘形
	单一振动模式	挠曲振动线性电机
驻波方式	同型简并模式	双重模式音片电机
	异型简并模式	平板状电机、多孔原板电机
	单一振动模式	振动片型、扭转耦合子型
	多模态振动模式	纵向转子＋扭转振子
	复合振动模式	扭转振子＋层压元件
电致伸缩公转子方式	单一振动模式	电致伸缩公转子型

3）定子表面椭圆运动获取方式。按照定子表面椭圆运动获取方式不同，超声波电机可分为单振动模式和多振动模式两种类型，见表 5.18-4。

表 5.18-4　超声波电机按定子表面椭圆运动获取方式分类

椭圆运动获取方式		电机类型或应用的具体振动模式
单振动模式		驻波型、行波型
多振动模式	模式转换型	振动片型 扭转耦合型 偏心耦合型
	多模振子型	纵向-弯曲耦合振动型 同心剪切与径向模耦合 环形元件的非轴对称振动与径向扩张振动 十字形振子的纵向和弯曲振动 极板的两个弯曲振动或有两个不同长度臂的音叉的弯曲振动
	模式旋转型	利用双简并振动模环的弯曲和扩张振动 环形极板的弯曲或非轴对称振动 空心圆柱的弯曲振动
	混合换能器型	扭转振子多层压电伸缩器 相互垂直的两个纵向振动 两个相垂直的双晶片

按照不同的分类标准，超声波电机可以分为不同的型式。本章涉及的超声波电机有环形行波超声波电机、圆柱定子超声波电机、单定子三自由度超声波电机、直线超声波电机、步进超声波电机和纵扭复合型超声波电机等。

1.3　功能与特点

超声波电机是一种新型的直接驱动型微电机，由于其原理完全不同于传统的电磁电机，因而具有很多不同于传统电磁电机的特性。

1）低速、大转矩。超声波电机振动体的振动速度和摩擦传动机制决定了它是一种低速电机，但它在实际运行时的转矩密度一般是电磁电机的 10 倍以上。因此，超声波电机可直接带动执行机构，不仅体积小、重量轻，而且还能提高系统的控制精度、响应速度和刚度。

2）无电磁噪声、电磁兼容性（EMC）好。超声波电机依靠摩擦驱动，无磁极和绕组，工作时无电磁场产生，也不受外界电磁场及其他辐射源的影响，非常适用在光学系统或超精密仪器上。

3）动态响应快，控制性能好。超声波电机具有直流伺服电机类似的机械特性，但制动响应更快。

4）断电自锁。由于定、转子间静摩擦力的作用，断电时电机具有较大的静态保持转矩，省去制动闸保持转矩，简化定位控制。

5）运行无噪声。由于振动体的机械振动是人耳听不到的超声振动，低速时产生大转矩，无齿轮减速机构，运行非常安静。

6）微位移特性。振动体的表面振幅一般为微米、亚微米，甚至纳米数量级。在直接反馈系统中，位置分辨率高，较容易实现微米、亚微米级、纳米级的微位移步进定位精度。

7）结构简单，设计形式灵活，自由度大，易实现小型化和多样化。由于驱动机理的不同，超声波电机形成了多种多样的结构型式。如为了满足不同的技术指标（如额定转矩、额定转速、最大转速等），可方便地设计成旋转、直线或多自由度超声波电机。为充分满足不同应用场合中结构空间的要求，即使同一种驱动原理的电机，可以设计成不同的安装型式。超声波电机的定、转子可以与拟采用运动系统中的固定部件和运动部件做成一体，简化整个系统的体积和重量。

8）易实现工业自动化流水线生产。结构简单，只需要金属材料的定、转子和激励振动的压电陶瓷，有些场合需应用热塑性摩擦材料和不同的胶粘剂，比传统电机更易实现工业自动化流水线生产。

9）耐低温/真空，适合太空环境。超声波电机及其驱动控制装置的耐低温、真空的特性，可将其作为宇航机械系统和控制系统的驱动装置。定、转子间不需润滑系统，不仅可以保证电机的正常运行，还可以减少使用润滑油或润滑脂给环境带来的污染。

1.4　应用

1）照相机调焦。日本 1982 年开始研究将超声波电机应用到照相机的镜头调焦中，1987 年成功地将超声波电机应用到 EOS 系列照相机配用的 EF 50mm F1.0L、EF 300mm F2.8L、EF (28～80)mm F2.8L-4L 等镜头中。该系列超声波电机数据见表 5.18-5。环形行波型超声波电机如图 5.18-1 所示。

20 世纪 90 年代中期，佳能公司又研制了一种直径 8mm、长 24mm 的柱体行波型超声波电机，用于照相机的调焦，如图 5.18-2 所示。该电机采用 Langevin 振子结构，便于生产，降低了成本，同时提高了可靠性。

表 5.18-5　佳能公司照相机用超声波电机数据

镜头型号	EF 50mm F1.0L	EF 300mm F2.8L	EF 28～80mm F2.8L-4L
外径（mm）	77	77	73
内径（mm）	67	67	63
厚（mm）	11.2	10	10.6
重量（g）	40	45	45
频率（kHz）	29	29	31
输入功率（W）	1	1	1
空载转速（r/min）	40	40	40
起动转矩（N/m）	0.16	0.16	0.14
效率（%）	45	35	35
角度分辨率	5′	1.25′	5′



图 5.18-1 环形行波型超声波电机



图 5.18-2 柱体行波型超声波电机

2）太空机器人中的应用。NASA 为了满足太空机器人对电机轻重量、大转矩的要求，在超低温环境正常工作，其属下的喷气推进实验室（JPL）开发了直径分别为 1.1in、2.5in 和 2.8in（1in＝2.54cm）的环形行波型超声波电机（见图 5.18-3），用于太空行走微型机器人的微型仪器机械臂和微型桅杆式机械臂等。图 5.18-4 为超声波电机驱动的太空机器人机械臂在收集小岩石。

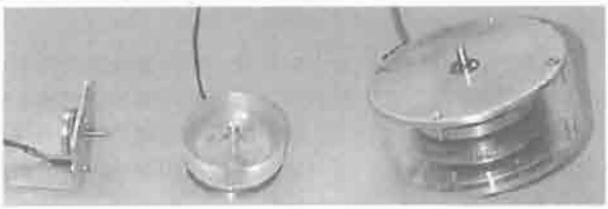


图 5.18-3 用于太空机器人的环形行波型超声波电机



图 5.18-4 太空机器人在收集小岩石

3）在精密定位装置和随动系统中的应用。超声波电机还可用于精密定位装置，如坐标平台的驱动。由于响应快，当位置传感器检测到目标位置信号瞬间，切断电源，电机立即停止，定位精度准确，只要开环控制即可实现较高精度的定位。其起、停响应快的特点很适合在随动系统，如导弹导引头装置中应用。

4）在民用装置中的应用。窗帘机采用超声波电机作为驱动元件，由于噪声很低，因此适合于办公场所、医院、宾馆、剧院、图书馆等对低噪声有特别要求的场合。

5）阀门控制。由于超声波电机无需减速机构即可实现低速运行，可用于阀门的精确流量控制。

6）扫描电子显微镜试料架的驱动。扫描电子显微镜（SEM）的真空试料室内的试料架位置采用超声波电机驱动，不仅省掉了复杂的传动机构，减少了故障和手动的误差，而且可实现自动驱动。

7）机器人关节驱动。超声波电机在低速度、大转矩和非连续的运转中具有比电磁电机更为优越的功能，非常适合机器人关节的直接驱动。

8）在核磁共振装置中的应用。超声波电机用在核磁共振装置的线圈调整装置上，微调附属于线圈上的调整用电容器容量。

9）在汽车专用电器中的应用。由于超声波电机可以做得很薄，而且转矩很大，可应用在汽车车窗的驱动装置中。此外，超声波电机还可用在雨刮器、车灯转向和汽车座椅调整等的驱动装置中。

10）微位移超声波电机（压电直线电机）。微位移超声波电机适用于微小位移运动，它能以纳米级位移驱动，可用于电子显微镜或扫描隧道显微镜，以及用来做光栅衍射刻线、干涉光谱仪扫描、天体星座图像分析和检测、高精度位移检测及分子测量设备中。

2 行波超声波电机基本原理

超声波电机是利用压电陶瓷的逆压电效应，并激发定子弹性体的超声振动而工作的，定子振动是超声波电机的动力源，也是超声波电机区别于一般电磁电机的主要特征。因此，对定子振动特性进行分析，不仅有助于揭示超声波电机的运行机理，还可以为超声波电机的设计和制造提供理论基础，而定子及其压电陶瓷的振动是决定电机振动性能的主要因素之一。

行波超声波电机利用弯曲-弯曲振动模态，定、转子间的接触是局部面接触，定子连续推动转子旋转，大大降低了定、转子接触界面的磨损，传动效率高。环形行波超声波电机的结构和原理相对比较简单易懂，参考国外环形行波超声波电机最早成功产业化生产的先例，以及国内最早研究的也是环形行波超声波电机的实际情况，以行波超声波电机为例说明其工作原理。

2.1 压电效应及压电陶瓷

压电陶瓷是压电振子的重要元件，超声波电机是借助于压电陶瓷的逆压电效应实现机电能量转换的。压电陶瓷的能量转换形式和效率决定了超声波电机的能量转换及其结构、转矩和输出功率。压电陶瓷性能的好坏是影响压电超声波电机性能的重要因素。

对于晶体构造中不存在对称中心的异极晶体，加在晶体上的张应力、压应力或切应力，除了产生相应的应变以外，还将在晶体中诱发出介电极化或电场，这一现象称为正压电效应。反之，若在这种晶体上加上电场，使该晶体产生电极化，则晶体也将同时出现应变或应力，这就是逆压电效应，两者统称为压电效应。

晶体的压电效应如图 5.18-5 所示。图 5.18-5（a）表示压电晶体中的质点在某方向上的投影。当晶体不受外力作用时，正电荷的重心与负电荷的重心重合，整个晶体表面不带荷电。但是，当沿某一方向对晶体施加机械力时，晶体就会由于发生形变而导致正负电荷重心不重合，也就是电荷发生了变化，从而引起了晶体表面的荷电现象。图 5.18-5（b）为晶体受压缩时荷电的情况，图 5.18-5（c）则是拉伸时的荷电情况。反之，如果将一块压电晶体置于外电场中，会引起晶体正负电荷重心的位移。这一极化位移又导致了晶体发生形变，这个效应就称为逆压电效应。

超声波电机使用的是在 PZT 上加入微量的添加物或置换元素进行改性后的压电材料。该材料具有高机电耦合系数、高机械品质因数和高稳定性等，在使用温度范围内没有相变点，温度特性相当稳定，有较高的居里点。

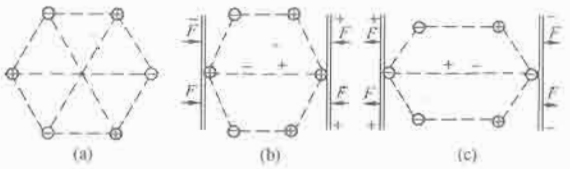


图 5.18-5　压电晶体产生正压电效应
(a) 压电晶体中质点在某方向投影；(b) 晶体受压缩时的荷电；(c) 晶体拉伸时的荷电

2.2　压电方程

压电陶瓷的基本方程是研究压电陶瓷的基本出发点。压电陶瓷的能量转换形式和效率决定了超声波电机的能量转换结构、转矩和输出功率。为了实用上的简便，当讨论压电材料的压电方程时，忽略磁场的影响。

2.2.1　介电特性

压电陶瓷属于电介质，未经极化工序处理前，压电陶瓷内部不存在极化强度，但极化处理后，压电陶瓷内部因自发极化的取向排列而产生剩余极化强度，这时，沿极化方向的性质就与垂直极化方向的性质不同，成为一个各向异性的多晶体。其介电特性可通过介电常数反映，有如下的关系

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \tag{5.18-1}$$

式中，E 为电场强度矢量，V/m；D 为电位移矢量，C/m²；ε 为二阶介电常数张量，F/m；1，2，3 为直角坐标系的三个坐标方向。

一般情况下，压电材料的常数以相对介电常数 ε_r 给出，$\varepsilon_r=\varepsilon/\varepsilon_0$，$\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}$F/m 为真空介电常数。

2.2.2　弹性特性

压电陶瓷除具有介电特性外，还具有一般弹性体的弹性特性。这种弹性特性可用描述物体受力状态的应力 T 和描述物体在应力作用下变形情况的应变 S 作为变量来描述。理想的弹性体在弹性范围之内，可以用胡克定律来描述 T 和 S 的关系

$$T=cS \tag{5.18-2}$$

c 为 6×6 阶的刚度矩阵，其元素 c_{ij} 为弹性刚度常数。刚度矩阵的逆矩阵存在时，记为柔度矩阵 s，$s=c^{-1}$，其元件 s_{ij} 为弹性柔度系数。在超声波电机中，压电晶体结构对称，柔度矩阵只有 12 个非零分量，$s_{11}=s_{22}=s_{33}$，$s_{44}=s_{55}=s_{66}=2(s_{11}-s_{12})$，$s_{12}=s_{13}$。

2.2.3　机电耦合

压电晶体的压电效应可以通过 $D=dT$ 来描述。D 为介质内电位移；T 为机械应力；d 为压电应变常数，是单位外加机械应力所引起的电位移，单位是 C/N(或 m/V)，共有 18 个独立分量。逆压电效应具有 $S=d^tE$，S 为机械应变；E 为电场强度。

具有压电性的晶体，通过压电效应能够将力学量（应力 T 和应变 S）与电学量(电场 E 和电位移 D) 相互联系在一起，即实现了机电耦合。从逆压电效应的角度来说，压电应变常数 d 越大，压电晶体材料机电转换效率就越高。这个参数是选择应用于压电超声马达上的压电材料的重要依据之一。

2.2.4　振动模态

外加交变电场可通过机电耦合效应，在压电体中激发出各种模态的弹性振动，当外电场的频率与压电体中的弹性振动的机械谐振频率一致时，压电体便进入了机械谐振状态，成为压电振子。

同柔度矩阵一样，对于极化轴沿 z 轴方向（即 3 轴）方向的压电陶瓷，垂直于 z 轴平面内各向同性，因此，与 z 轴相垂直的任意方向都可以取作为 x 轴（即 1 轴）方向。即压电应变常数矩阵为

$$\boldsymbol{d}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

压电晶体中能被外电场激发的振动模态，必须有适当的机电耦合途径，即把电场能转换成与该振动模态相对应的弹性能。如果沿着压电体的某一方向施加电场，在线性理论的范围内，即可以根据与该方向相关的非零压电常数来判断何种振动模态有可能被激发。按照电场激励方向和压电体非零压电应变常数的对应关系，可以判断在压电振子中能够激发出何种振动模式。

经过极化处理的压电陶瓷，一般有 5 个非零的压电应变常数：$d_{31}=d_{32}$，d_{33}，$d_{15}=d_{24}$，压电应变常数矩阵 $\boldsymbol{d}$ 的分量缩减为 3 个非零分量 d_{33}，d_{31}，d_{15}，压电陶瓷中主要通过三种振动模式进行机电耦合，分别是纵向模式、横向模式和剪切模式。

若沿极化轴 x_3 方向加电场，则通过 d_{33} 的耦合在 x_3 方向上激发纵向振动，并通过 d_{31} 和在 d_{32} 垂直于极化方向的 x_1 轴和 x_2 轴上激发其相应的横向振动。而在垂直于极化方向的 x_1 轴上加电场，则通过 d_{15} 激发起绕 x_2 轴的剪切振动，如图 5.18-6 (a)、(b)、(c) 所示。

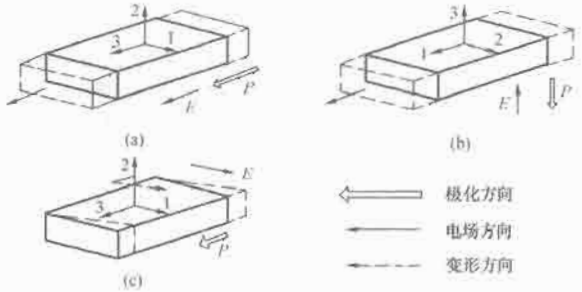


图 5.18-6　压电振子的不同振动模式
(a) 纵向模态 d_{33}；(b) 横向模态 d_{31}；(c) 垂直于电场方向的剪切模态 d_{15}

2.2.5　压电方程

压电晶体的机电转换特性，在一定条件下，尤其是小信号条件下，可以用比较简单的线性压电方程来描述。

压电方程是对压电晶体的介电性、弹性、压电性的综合表达。在弹性限度范围内，外电场不为零时，应变可由应力和电场两方面的作用产生，而电位移也可以由应力和电场两方面的作用产生。压电陶瓷存在机械和电气两种边界条件，其中，机械分为自由和夹持，电气分为短路和开路两种状态。因此，相应的综合描述晶体极化、弹性之间机电耦合作用的压电方程组，也跟电磁电机的位移方程类似，有 4 种组合。也就是说，E、D 及 T、S 这 4 个两组变量中各选取一个量作为自变量时，可以得到 4 种不同类型的压电方程。

对应于机械自由（$T=0$，$S\neq0$）和电学短路（$E=0$，$D\neq0$）的边界条件的压电方程——第一类压电方程

$$\left.\begin{aligned} D &= dT + \varepsilon^T E \\ S &= s^E T + d^t E \end{aligned}\right\} \tag{5.18-3}$$

式中，s^E 为恒定电场强度下的机械柔顺矩阵；ε^T 为恒定机械应力下的介电常数矩阵；d 为压电应变常数矩阵；上标 T 表示转置。

对于不同的边界条件和不同的自变量，可以得到不同的压电方程组。如机械夹持（$S=0, T\neq 0$）和电学短路（$E=0, D\neq 0$）的第二类压电方程为

$$\left.\begin{aligned} D &= \varepsilon^S E + eS \\ T &= -e^t E + c^E S \end{aligned}\right\} \tag{5.18-4}$$

式中，ε^S 为恒定机械应变下的介电常数矩阵；e 为压电应力常数矩阵；c^E 为恒定电场强度下机械刚度系数矩阵。

机械自由（$E=0$，$S\neq 0$），电学开路（$D=0$，$E\neq 0$）时的第三类压电方程

$$\left.\begin{aligned} E &= \beta^T D - gT \\ S &= g^t D + s^D T \end{aligned}\right\} \tag{5.18-5}$$

式中，β^T 为恒定机械应力下的介电隔离常数矩阵；g 为压电电压常数矩阵。

机械夹持（$S=0, T\neq 0$），电学开路（$D=0, E\neq 0$）时的第四类压电方程

$$\left.\begin{aligned} E &= \beta^S D - hS \\ T &= -h^t D + c^D S \end{aligned}\right\} \tag{5.18-6}$$

式中，β^S 为恒定机械应变下的介电隔离常数矩阵；h 为压电刚度常数矩阵。

2.2.6 描述压电材料物理特性的重要参数

1）介电损耗。压电材料是电介质，如果在电介质电极板两端施加交流电压，介质所积蓄的电荷有两种分量：一种为有功部分，会产生能量损耗，并由此变为热能，称之为介电损耗；另一种为无功部分（电压与电荷异相）。产生介电损耗的原因比较复杂，一个原因是由极化迟滞造成的。介质在交变电场作用下，迟滞现象使极化追随不及而产生滞后，从而产生介质损耗。当工作频率远低于共振频率，没有介电损耗，一个陶瓷晶片的电学性能如同一个静态电容 C_0；当有介质损耗时，多了一个介质损耗电阻 R_d。损耗系数通常用损耗角 δ 的正切值 $\tan\delta$ 来表示

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega C_0 R_d} \tag{5.18-7}$$

$\tan\delta$ 是判别压电材料性能好坏和选择应用于压电超声波电机材料的另一个重要依据。$\tan\delta$ 越小，材料性能越好，超声波电机本身的功率损耗也就越小；另外，由于介电损耗与温度、电场强度以及交变电场的频率有关，因而介质损耗 $\tan\delta$ 与这些物理量有关。

2）电学品质因数。压电振子在交变电场作用下，由于电导和极化驰豫现象的存在，会耗散掉一部分能量，这可通过电学品质因数 Q_e 来衡量，其等于介质损耗角正切 $\tan\delta$ 的倒数

$$Q_e = -\frac{I_C}{I_R} = \frac{1}{\tan\delta} = \omega C_0 R_d \tag{5.18-8}$$

电学品质因素 Q_e 通常可用阻抗电桥或电容电桥在远离振子谐振点的频率下直接测量。

3）机电耦合系数。机电耦合系数是综合反映压电振子的机械能与电能之间耦合程度的参数，同时取决于材料的介电常数、弹性常数和压电常数。不同形状和不同振动模式所对应的机电耦合系数不同。对应于沿 x_3 方向施加电场而沿 x_1 轴方向伸缩振动的压电振子来说，其机电耦合系数为

$$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{S_{11}^E \varepsilon_{33}^T}} \tag{5.18-9}$$

机电耦合系数是个小于 1 的无量纲量。在振子中，未被转换的那一部分能量是以电能或弹性能的形式，可逆地存储在压电体内。如压电振子谐振时能量转换效率可以高达 90%以上，但如果在失谐下工作，或者匹配不佳时，能量转换效率将大大降低。因此，设计超声波电机时，人们总希望超声波电机的工作频率和压电振子的谐振频率一致。

4）机械品质因数。压电振子的机械品质因数 Q_m 同振子谐振时的振动放大倍数相关，由振子压电陶瓷、黏结层和弹性体材料在循环应力应变作用下的内部摩擦确定，是衡量振子谐振时机械内耗大小的一个重要参数。一般陶瓷的 Q_m 因配方和工艺条件的不同而差别很大。例如，锆钛酸铅陶瓷材料的 Q_m 可在 50 ～ 3000 之间。通常如无特殊说明，压电材料的 Q_m 是指圆片试样在其平面内的径向振动模态。

2.3 压电振子及其等效电路

为了描述超声波电机定子振动情况，前面的理论推导中，采用了电位移 D、电场强度 E、应力 T 和应变 S 等机电物理量。作为压电振子的定子，其机电转换牵涉到力学和电学相互耦合的问题，工程上常通过机电类比将压电振子转换为等效电路，经过实验测量及等效电路参数估计来评估定子的性能。同其他分析方法相比，等效电路模型计算相对简单，易于理解。

2.3.1 压电陶瓷的系统方程

式（5.18-3）～式（5.18-6）是关于应变与应力、电位移和电场关系的一种表达，所描述的是压电振动的微观现象，而在工程实际中需要的是电压、电流、力及速度之间的关系，压电振子的系统方程（含压电陶瓷片和金属弹性体定子）为

$$\left.\begin{aligned} -F &= AU - Zv \\ I &= Y_d U + Av \end{aligned}\right\} \tag{5.18-10}$$

式中，F 和 v 分别是机械端的力和速度；U 和 I 分别是电气输入端的电压和电流；Z 和 Y_d 分别是压电陶瓷系统的阻抗和导纳；A 是力系数（单位 N/V 或 C/m）。

2.3.2 等效电路模型

与弹簧受一定力作用下的情况类似，压电陶瓷在不连接机械负载时，施加直流电压 U，它就会发生位移并运动至一平衡位置，如图 5.18-7（a）、（b）所示。

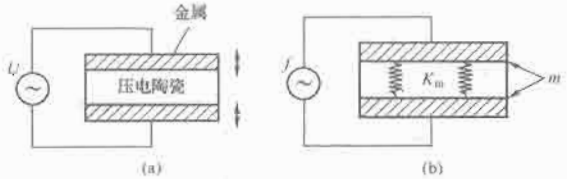


图 5.18-7 压电陶瓷的机电转换模型
（a）机电转换；（b）机械振动模型

（1）等效电容

$$C_m = \frac{A^2}{K_m} \tag{5.18-11}$$

（2）等效电感

$$L_m = \frac{m}{A^2} \tag{5.18-12}$$

当压电陶瓷受到交流电压的激励时，会发生伸张和收缩振动，压电陶瓷黏结到金属弹性体上时，金属弹性体也会随之发生振动。压电振子的振动幅值和相位不仅受弹簧常数 K 的影响，而且也会受到装配体，即金属和压电陶瓷的质量 m 的影响，而等效电感 L_m 正好用来表示质量对压电振子振动的影响。

（3）压电陶瓷的等效电路

压电陶瓷的 LC 等效电路，如图 5.18-8 所示。

（4）压电振子完整的等效电路

单相驱动的自由定子自由谐振时的等效电路如图 5.18-9 所示。

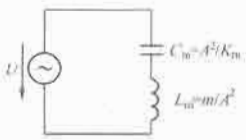


图 5.18-8　压电陶瓷的等效电路

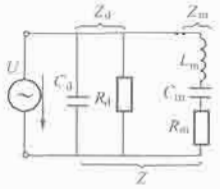


图 5.18-9　压电振子完整的等效电路

图中，阻抗 Z 可分为 Z_m、Z_d 两个部分，Z_m 由 L_m、C_m、R_m 构成，分别表示压电振子的等效质量、刚度和损耗；Z_d 由夹持电容 C_d 和介电损耗 R_d 并联构成。通常超声波电机中的压电陶瓷介电损耗很小，因而可忽略 R_d、R_m。由此，压电振子间的导纳特性可表示为

$$Y_m = \frac{j\omega C_m}{1-\omega^2 L_m C_m + j\omega C_m R_m}$$

$$Y_d = \frac{1}{R_d} + j\omega C_d$$

$$Y = Y_d + Y_m = \frac{1}{R_d} + j\omega C_d + \frac{j\omega C_m}{1-\omega^2 L_m C_m + j\omega C_m R_m} \tag{5.18-13}$$

上述等效电路及其等效参数只适合压电振子在谐振频率附近区域内的等效，实际测试中会看到压电陶瓷的多个谐振频率。因此宽频带内研究振子的阻抗频率特性，则需要更复杂的等效电路。

2.4　行波超声波电机基本结构和工作原理

2.4.1　基本结构

行波超声波电机有环形行波型超声波电机（简称 RTWUSM）和圆盘式超声波电机（简称 DTUSM），RTWUSM 是目前应用和研究最多的电机。图 5.18-10 所示为 RTWUSM 的基本结构分解图，定、转子均为环形结构。其中，定子上开有齿槽，转子同定子接触面覆有一层特殊的摩擦材料，并依靠碟簧变形所产生的轴向压力紧压在一起。

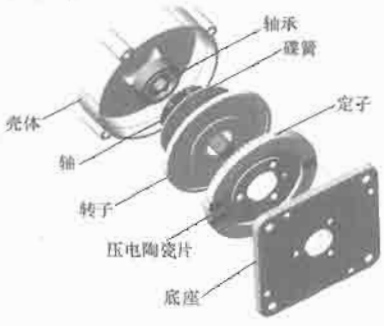


图 5.18-10　RTWUSM 的基本结构分解图

图 5.18-11 所示为压电陶瓷的电极结构图，由数段极化过的压电陶瓷片组成。阴影区域为未敷银区（或者对应部分的敷银层被磨去），将压电陶瓷的上下极板分隔成不同的区域。图 5.18-11（a）中相邻两个压电分区的极化方向相反，分别以“+”“−”表示，在电压激励下一段收缩，另一段伸长，构成一个波长的弹性波。图中所示的极化分区可组成三个电极，其中 A 区和 B 区表示驱动 RTWUSM 的两相电极（利用压电陶瓷的逆压电效应），而 S 区是传感器区（利用压电陶瓷的正压电效应），可实时反映定子的振动情况，其反馈信号可用于控制驱动电源的输出信号。图中，压电陶瓷环的周长为行波波长 λ 的 n 倍（图中 $n=9$），A 区和 B 区各分区所占的宽度为 $\lambda/2$，S 区宽度为 $\lambda/4$，用于将两驻波合成为一个波长的行波，也可作控制和测量用反馈信号的传感器，GND 区为 $3\lambda/4$，作为 A 区和 B 区的公共地。

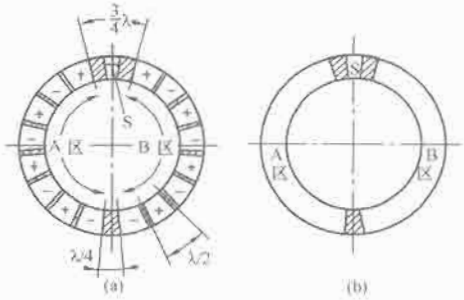


图 5.18-11　压电陶瓷电极结构图
（a）正面；（b）反面

2.4.2　基本原理

（1）行波的产生

由于压电陶瓷相邻分区极化方向相反，在电压激励下，由压电陶瓷的非零压电常数 d_{31} 和相邻压电分区分别伸张和收缩，从而激发横向长度伸张和收缩振动模，可以在定子弹性体中激励出弯曲振动，如图 5.18-12 所示。由于压电体在一个驱动信号作用下，一般只能获得驻波分布，即使用单相交变电压激励压电陶瓷环的 A 区或者 B 区，只能在定子环中激发出单一的驻波振动；而使用两相交变电压同时激励 A 区和 B 区，在一定条件下就可以在定子环中激发出行波振动。

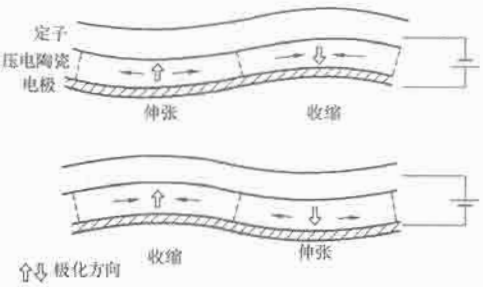


图 5.18-12　定子弯曲振动产生机理

设 A 相 B 相两列驻波叠加可得定子环表面质点的横向振动位移为

$$\begin{aligned} w(x,t) &= w_A(x,t) + w_B(x,t) \\ &= \xi_A \cos kx \cos\omega t + \xi_B \sin kx \cos(\omega t + \phi) \end{aligned} \tag{5.18-14}$$

式中，w_A、w_B 为弹性体表面横向位移；ξ_A、ξ_B 为 A 相和 B 相振动的振幅；$k = 2\pi/\lambda$ 为弹性波振动的波数；$\lambda = L/n$ 为弹性波波长；n 为周向振动模态阶数；$L = 2\pi R$ 为定子环圆周长；R 为

定子环平均半径；$k=n/R$；ϕ 为 A 相、B 相驱动间的相位差。

当压电陶瓷对称极化时，有 $\xi_A=\xi_B=\xi,\phi=\pi/2$，有

$$w(x,t)=\xi\cos kx\cos\omega t-\xi_B\sin kx\sin\omega t=\xi\cos(kx+\omega t) \tag{5.18-15}$$

当 $\xi_A=\xi_B=\xi,\phi=\pi/2$ 时，有

$$w(x,t)=\xi\cos kx\cos\omega t+\xi_B\sin kx\sin\omega t=\xi\cos(kx-\omega t) \tag{5.18-16}$$

由上式可得，只要 A、B 两相驱动电压相位差为 $\pi/2$ 时，在定子环中形成行波，而且当其中某一相反相时，行波的行进方向相反，即转子反向旋转。

当 $\xi_A=\xi_B=\xi,\phi=\pi/2$ 时，定子表面质点纵向振动位移

$$u(x,t)=-kh\xi\sin(kx+\omega t) \tag{5.18-17}$$

式中，h 为定子上表面到中性层的距离。由式（5.18-16）和式（5.18-17）可得定子表面质点运动轨迹方程为

$$\frac{w^2(x,t)}{\xi^2}+\frac{u^2(x,t)}{(kh\xi)^2}=1 \tag{5.18-18}$$

当 $\xi_A=\xi_B=\xi,\phi=\pi/2$ 时，由式（5.18-17），可以获得定子表面质点运动的纵向速度为

$$v_z(x,t)=\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}=-kh\xi\omega\cos(kx+\omega t) \tag{5.18-19}$$

在椭圆运动最高点时（即波峰处），v_r 获得最大值

$$v_{rmax}=-kh\xi\omega \tag{5.18-20}$$

式中的负号表示定子表面质点运动到椭圆最高点时的运动方向正好与行波前进方向相反。

（2）定子共振频率与振幅的计算

1）定子共振频率。对于 RTWUSM 的 B_{0n} 振动模态，可得圆环的共振频率为

$$f_{0n}=\frac{\lambda_{0n}^2}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{M(1-\gamma^2)}} \tag{5.18-21}$$

式中，λ_{0n} 表示其对应的共振模态在圆周方向存在 $2n$ 条节径，半径方向无节圆存在。

复合梁是由压电陶瓷及金属梁组成的，金属梁的上面还开有齿槽，开齿槽是为了放大共振振幅和减小刚度。复合梁的共振频率计算公式为

$$\omega_n=\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2\sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \tag{5.18-22}$$

2）定子振动振幅。RTWUSM 的定子振动是由压电陶瓷的应变激发的。由于逆压电效应，z 方向激励压电陶瓷片时，可在 x 方向产生应变，此应变对定子施加弯曲转矩，从而使定子产生弹性挠曲。定子在谐振时的弹性挠曲，即定子的振幅，可以用动态放大系数乘以静态弹性挠曲量来求得。压电陶瓷沿 z 正向加电压，压电陶瓷将在 z 方向产生弹性扩张且在 x 方向产生弹性收缩，同时引起简支梁向上挠曲。在简支梁的中点处 $w(x)$ 的最大值为

$$w_{max}\left(x=\frac{L}{2}\right)=-\frac{3}{16}\frac{d_{31}E_3}{h_p}\frac{L_r^2}{r_k} \tag{5.18-23}$$

2.5 定、转子间接触机理

行波超声波电机通过定子和转子间摩擦来传递动力，如何增大定子和转子间的摩擦力，提高输出扭矩，减小磨损，延长超声波电机的使用寿命是超声波电机研究的关键。由于摩擦现象发生在定、转子的接触面上，定子和转子的材料性质、加工方法和精度、安装精度和使用条件都对摩擦界面产生影响。超声波电机的扭矩由定子、转子间摩擦界面所产生的摩擦力决定。

2.5.1 线接触、库仑摩擦模型

为了便于研究，假定超声波电机的定、转子在行波波峰处为刚性接触，将环形定子展成简支的直梁。设定子和转子间为库仑摩擦，无滑动，则在接触的直线处定子的速度等于转子的速度。F_B 为加在转子上的负载力或阻力，F_N 为加在转子上的轴向压力，F_T 为定子传递给转子的摩擦力。

在无滑动条件下，当 F_B 小于堵转力时，转子将处于稳态转动，F_T 将与 F_B 相等，且转子转速也与定子在波峰处速度相等。于是，转子在接触直线处无滑动时，所加最大负载力为

$$F_T=\mu_s F_N \tag{5.18-24}$$

式中，μ_s 为静态摩擦系数。

若转子与定子在接触直线处产生滑动，则摩擦力为

$$F_T=\mu_d F_N \tag{5.18-25}$$

式中，μ_d 为滑动摩擦系数。

一旦定子、转子间产生滑动，电机产生的扭矩为

$$M_r=\mu_d F_N r \tag{5.18-26}$$

电机理想情况下的速度—转矩特性曲线如图 5.18-13 所示。当阻力 F_B 不断增加，直至转子转速为零，此时 F_B 的产生的转矩大小等于 $\mu_d F_N r$。进一步增加 F_B，则电机将反方向运转，负载特性曲线落在第四象限内。当 F_B 的作用力相反时，负载特性曲线落在第二象限，当继续增加 F_B，转子的速度将进一步增加，转子与定子产生滑动，此时电机输出扭矩为

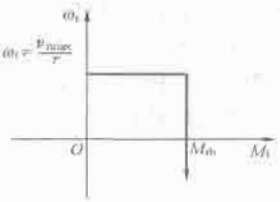


图 5.18-13 电机理想情况下的速度—扭矩特性曲线

$$M_r=-\mu_d F_N r \tag{5.18-27}$$

2.5.2 面接触、库仑摩擦模型

由物理知识可知，这种理想的线接触模型在电机实际工作时不会实现，定、转子在接触处必然会产生变形，更符合实际接触状况的是柔性转子和刚性定子。

（1）接触面分析

刚性定子指定子的横向位移轮廓曲线在与转子接触时不变形，柔性转子在与定子行波接触时再不是一条接触线而是一个接触面，且随转子的接触面的压力增大而增大。

若转子在 $-x_0$ 到 x_0 区域内与定子接触。转子以速度 v_r 运动时，在定子表面 $-x_0$ 到 x_0 区间内质点的水平速度各不相同，当定子表面质点在纵向位移 $u>0$ 时，其水平速度与 x 轴相反；反之其水平速度与 x 轴相同。定子与转子接触区域大小的参数 x_0 可表示为 $0<x_0<\lambda/4$，即接触高度小于定子最大振幅 ξ_0。在这一区域内，定子表面质点水平速度方向与 x 轴方向相反。

（2）库仑接触模型

图 5.18-14 为定、转子间在接触区域内相互作用力示意图。转子上的虚线代表转子在压力 F_N 作用下，与定子接触时所产生的变形。设 $p(x)$ 为定子压力分布函数，则

$$F_N=\int_{-x_0}^{x_0}p(x)\mathrm{d}x \tag{5.18-28}$$

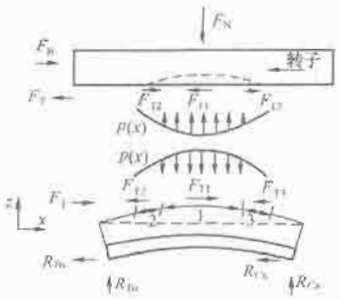


图 5.18-14　接触区摩擦力、压力分布图

图中，在接触区 1 内，由于定子的水平速度大于转子速度，则在接触区 1 内对转子产生的摩擦力方向与 x 轴相反。在接触区 2、3 内，定子的水平速度小于转子速度，则定子对转子产生的摩擦力 F_{T2}、F_{T3} 与 x 轴正向一致。当转子压力进一步增加，使定子与转子接触高度大于定子振幅 ξ_0 时，其压力分布函数和产生最大扭矩的条件如图 5.18-15 所示。a 对应 x 轴的 $\lambda/4$ 处，b 对应 x_0 处，定子与转子接触区 ab 段内为与转子转速相反的水平速度分量，则在较大负载的条件下，转子可产生反向旋转。

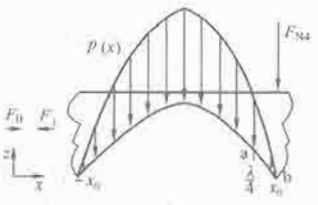


图 5.18-15　转子压力增加时的接触压力分布示意图

(3) 赫兹接触模型

由上面分析可知，要精确计算超声波电机的扭矩—转速关系曲线，就必须知道接触面的压力分布函数和接触面积的大小。尽管行波超声波电机定、转子间的接触与一般的赫兹接触不完全相同，但引用赫兹接触理论能较好地从理论上解决压电行波超声波电机的接触摩擦问题，从而建立起行波超声波电机的转矩数学模型。根据电机的实际工作情况，有如下假设：

1) 行波超声波电机的定子与转子材料均为弹性体。

2) 定子的行波表面与转子接触均是光滑的。

3) 定子与转子表面不完全紧密结合。

4) 行波超声波电机的定子与转子之间无相对滚动。

5) 行波超声波电机的转子与定子在行波波峰处的接触为曲率圆柱面的接触。

图 5.18-16 为圆柱体与弹性平面接触坐标系，其中 z 轴通过定子波峰处，x 轴放在定子变形前水平表面。赫兹接触宽度为 a，在 x_r 处定子与转子以相同的水平速度运动。

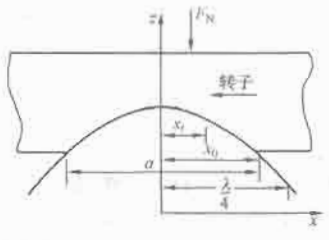


图 5.18-16　赫兹接触坐标示意图

压力分布函数

$$p(x)=k_r A_p[\cos(kx)-\cos(kx_0)] \tag{5.18-29}$$

转子的切向摩擦力为

$$F_T=\frac{\mu_d F_N}{\phi(x_0)}[2\phi(x_r)-\phi(x_0)] \tag{5.18-30}$$

由于在 x_r 处定子沿 x 轴切向速度与转子速度一致，则

$$x_r=\frac{1}{k}\arccos\left(\frac{v_r}{v_{s\max}}\right)=\frac{1}{k}\arccos\left(\frac{\omega_r}{\omega_{s\max}}\right) \tag{5.18-31}$$

通过转子半径 r 可求得超声波电机转矩的计算公式，即

$$M_r=\frac{\mu_d F_N r}{\phi(x_0)}[2\phi(x_r)-\phi(x_0)] \tag{5.18-32}$$

赫兹接触模型的效率为电机的机械输出功率与输入功率之比，即

$$\eta_m=\frac{P_m}{P_i}=\frac{P_m}{P_m+P_l} \tag{5.18-33}$$

式中，P_l 为定子和转子间由摩擦而引起的热损耗，即

$$P_l=\frac{\mu_d F_N r}{\phi(x_0)}[2\psi(x_r)-\psi(x_0)] \tag{5.18-34}$$

式中，
$$\psi(x)=\frac{1}{2}kx\omega_{s\max}+\frac{1}{4}\omega_{s\max}\sin(2kx)-[\omega_{s\max}\cos(kx_0)+\omega_r]\sin(kx)-kx\omega_r\cos(kx_0) \tag{5.18-35}$$

$$\phi(x)=\sin(kx)-kx\cos(kx_0) \tag{5.18-36}$$

则对赫兹接触模型，行波超声波电机的机械效率为

$$\eta_m=\frac{M_r\omega_r}{\frac{\mu_d F_N r}{\phi(x_0)}[2\psi(x_r)-\psi(x_0)]+M_r\omega_r} \tag{5.18-37}$$

由上可知，当转子压力较小时（如当转子在正压力 F_N 作用下使 $x_0=\lambda/16$ 时），超声波电机输出效率最大；当转子在正压力 F_N 作用下使得 $x_0=\lambda/4$ 时，超声波电机输出扭矩最大。

2.6　等效电路分析

RTWUSM 应用两个相同驻波叠加形成的行波驱动电机转动，整个电机可由图 5.18-17 所示的等效电路表示。考虑实际影响因素的 RTWUSM 等效电路如图 5.18-18 所示。

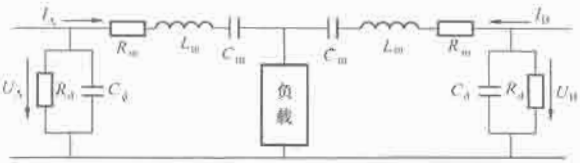


图 5.18-17　两相驱动 RTWUSM 的完整等效电路

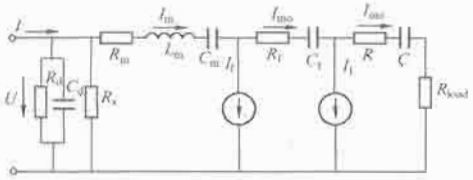


图 5.18-18　考虑实际影响因素的 RTWUSM 等效电路

图中，R_x 表示由预压力引起的振动损耗，R_f 表示由预压力引起的摩擦损耗，C_f 表示预压力引起的频偏效应，R、C 表示电机转子输出功率。其中，等效电路参数 R_d、C_d、R_m、C_m 及 L_m 可通过对定子导纳特性的测量获得，而其他电路元件参数及可变参数的温度系数、受控电流源的比例系数，需要通过实验结果与模型仿真结果的对比进行不断调整来获得。当确定了一个电机的等效电路参数以后，就可以用此等效电路

代替真实的电机，用于驱动电路的设计和在运行环境下进行控制方法的仿真研究。

3 行波超声波电机的设计要点

超声波电机设计方法必定是建立在模型分析基础之上的。首先，需要对超声波电机运行过程中的两个能量转换过程进行建模。它们包括压电陶瓷-定子之间的机电能量转换和定子-转子之间的机械能量转换。然后，根据所建立的模型，由给定的电机结构和材料参数，以及外加的预压力大小和负载转矩的情况，计算电机的输出性能，根据计算结果对原始的参数进行调整和重新计算，完成设计工作。

3.1 定子的设计

RTWUSM的主要性能取决于定子的振动特性，因而定子的设计在整个设计中是至关重要的。它主要包括内外径的选择、振动模态设计、定子厚度设计、齿形齿数设计等几个方面。

3.1.1 内、外径的选择

根据上节讨论，可以估算出满足设计要求的性能指标的定子外径 r_2 大小。就RTWUSM而言，其压电陶瓷的内外径与定子内外径相同，因而可根据压电陶瓷的内耗大小确定定子内径。当内外径比在0.7左右的时候，压电振子的自由振动能量损耗最小，输出能量最大。

考虑到实际中压电陶瓷加工的限制，定子的直径一般不大于100mm，也不小于10mm。在实际生产中，正如传统的感应电机综合设计中进行的那样，往往希望定子的外形尺寸是规定的，如外径尺寸可选择0或者5结尾的尺寸规格，并尽量向已有的尺寸规格接近。

3.1.2 振动模态设计

定子振动模态的选择主要考虑振动三方面的因素：一是定子驱动相在空间上错开四分之一个波长，它决定了振动模态必须为奇数模态；二是定子的振动频率，需要大于20kHz；三是定子的振动寿命，决定了振动的模态数。通过振动模态的设计，可以确定定子环的厚度。

3.1.3 振动模态的奇数性

对于单片压电陶瓷两相驱动的RTWUSM而言，通常所选择的模态为 B_{0n} 模态，n 为RTWUSM圆环工作时的波数，为奇数，这主要是从两相对称角度上考虑的。因为整个定子环上需要有一个波长的空间区用来分隔定子的A相和B相，同时也作为反映定子振动情况的反馈电极区。因而如果选择偶数模态的振动，必然导致A相或者B相在空间上所占用的电极区不相等，从而导致两相的不平衡；通过间隔两个波长区也可使两相相等，但是这样降低了定子可激励区域的利用，因而不便采用。

如果A相和B相不能够完全对称，则在定子阻抗所表示的谐振频率上面有所偏差，同时激励A相和B相时，两相产生的超声振动的驻波振幅不一致，无法形成一个完全的行波，影响电机的性能输出。在性能估算中，需要对所计算的量使用经驻波比归化过的值。东南大学超声波电机小组设计制造的系列RTWUSM中，充分考虑了此种因素，选用了 B_{03}、B_{05}、B_{07}、B_{09}、B_{011} 等奇数振动模态。

3.1.4 振动模态阶数的选择

RTWUSM的运行需要定子有一定的振动幅值，这里从定子振动的疲劳寿命及电压激励角度考虑振动模态阶数的选择。随着振动模态阶数 n 的增加，定子机械损耗及压电陶瓷内部损耗增加，Q_b 减小。要保持定子振幅 w_{max} 恒定，必须大大增加激励电场强度，这样会增加压电陶瓷的损耗，增加压电陶瓷使用中的循环应力，使得疲劳寿命降低。因而，希望定子的振动模态阶数同定子的半径能够成比例的变化，使得定子振动的行波波长 $\lambda = 2\pi r/n$ 能够基本保持恒定。

因而，定子振动模态数的选择原则为，不同半径定子的振动模态数变化比例应该小于等于半径的变化比例。按此原则，可使压电振子等效电路测试中的动态导纳在定子的整个振动谱图中为最大值，也即振动的损耗最小。

3.1.5 定子厚度设计

由以上两步可以确定定子的振动模态和内外径大小，一般定子材料选择不锈钢或者铍青铜，因而材料特性可知，此时，如果知道了定子的厚度，就可求出定子圆环在相应振动模态下的谐振频率，按照设计要求，此谐振频率要在超声范围（即大于20kHz）内。考虑到附加齿以后，定子环的谐振频率会有所下降，因此设计定子的谐振频率 $f_{0n} \geqslant 30\text{kHz}$。

3.1.6 定子齿设计

1）齿数的设计。为了放大椭圆运动的振幅，常在定子圆环上设置位移放大机构——齿。一般认为，当定子齿的宽度远小于定子环中的波长时，则齿对振动的影响很小，故要求齿宽 $b = 0.1\lambda$，λ 为定子行波波长。齿槽的宽度同加工刀具有关，内径的齿宽要大于一定的数值（此值同齿高有关系），以免加工过程中产生变形。

另外齿数的选择还要考虑加工过程中铣槽时的分度情况，如选择40、45、60、72、80、90、120等，便于分度。例如，对于振动模态为 B_{05} 的5波长的直径为30mm的超声波电机，选择齿数为45。

2）齿高的设计。定子齿将定子弹性体的弯曲振动有效地转化为驱动转子的切向运动，它的高度是一个非常重要的设计因素，其设计方法多种多样。M. Aoyagi等从振动角度提出了定子齿的最优化设计，即使得定子齿的一阶振动频率同定子环的谐振频率一致，从而可充分利用谐振状态放大定子的振动。由于实际制造及定子结构方面的偏差，要想使二者完全一致非常困难，因而实际上不采用此种方法。McFarland研究了齿高对一个完整行波电机模型整体效率的影响，通过优化齿高能够极大地提高电机的效率和性能。当齿高超过这一点，将或多或少地降低效率，减小堵转力矩，但是增加了空载转速。当齿高太矮时，会对效率和性能造成更多不利的影响，该结论由N. Hagood通过RTWUSM的解析模型所证实。

3.1.7 定子支撑部设计

定子支承部分的厚度一般选择能够满足定子的支撑强度即可，可在0.5～1mm之间选择。经有限元计算分析表明，定子支承部的位置几乎不影响定子振动的固有谐振频率及挠曲幅值。一般将定子支撑的位置设定在定子环的中间位置。

3.1.8 验证

在进行电机转子设计之前，需要对所设计的电机定子进行验证，看其是否能够满足所要求的转矩、功率及速度等要求。这里需要设定电机定、转子的平均接触半径 $\bar{R}$ 和接触宽度 a，定、转子间的动态摩擦系数及转子的面接触刚度。其中，平均接触半径 $\bar{R}$ 一般接近定子的外径，接触宽度一般选择3～5mm，则 $\bar{R} = r_2 - a/2 - 1$；动态摩擦系数根据测试所选择的摩擦材料与定子材料间的动摩擦而获得。

对定子设计的转矩校核的步骤如下：根据定、转子接触模型可知，当周向接触比 $K_c = 0.50$ 时，可以求得电机所能

够输出的最大输出转矩 M_{rmax}。比较最大输出转矩 M_{rmax} 和设计要求的输出转矩 M_r。

1）如果 $M_r > M_{rmax}$，即设计的定子输出的最大转矩小于设计要求，则此定子设计无法满足设计要求，需要考虑增加定子的外径 r_2、定转子接触面的动态摩擦系数 μ_d，增加接触宽度 a 或者提高激励电压。

2）如果 $M_r \gg M_{rmax}$，即设计的定子输出的最大转矩大于设计要求，定子的设计是可行的。如果所给出的设计要求还包括机械功率 P_m 和空载转速 ω_0，则还需要对机械功率 P_m 和空载转速 ω_0 进行校核。

3）如果 $P_{mmax} < P_m$，则需要考虑增加定转子接触面的动态摩擦系数 μ_d，增加接触宽度 a，提高激励电压或者增加定子的外径 r_2；如果 $\omega_{max} < \omega_0$，则需要增加齿高，提高激励电压，或者采用更高阶的振动模态。在满足设计要求的情况下，认为定子设计是可行的。

3.2　转子设计

行波超声波电机转子主要用于输出转矩，并通过它施加定、转子间的预压力。在厘米级 RTWUSM 中，考虑到转子的低密度、小惯量要求，常选择铝转子。设计电机转子时，主要考虑的是转子的柔性及定、转子的静态径向弯曲配合，并由此确定、转子的结构尺寸和摩擦材料的厚度。

3.2.1　转子的柔性

由前述的定、转子接触模型可知，振动的定、转子间的接触变形对于将齿端的周向振动通过摩擦力转换为转子的运动是非常必要的，并要求在波峰处有一定的接触长度。转子通过柔性变形能够减小摩擦接触中的滑动损耗，从而优化电机的性能。

对于二维定、转子接触模型，由垂直振动引起的接触压力沿周向按正弦规律变化，定子表面的周向速度也按正弦变化，为了避免与波峰的低速或者反方向的速度区域接触，接触长度略小于半个波长，此时往往由摩擦层的变形来实现定、转子的摩擦驱动。转子的柔性也可由摩擦层的柔性和转子的结构合成，在垂直振动下可产生变形，从而实现良好的定转子接触。目前大多数的电机都同时利用转子结构和摩擦层的柔性。

3.2.2　定转子径向弯曲配合

由于 RTWUSM 是基于摩擦驱动机理工作的，在厘米级范围内，其使用寿命的限制成为制约行波超声波电机大量应用的一个障碍。为了提升使用寿命，可增加定转子接触面积，减小接触压力，从而降低摩擦层的损耗和增加其磨损寿命。

1）径向弯曲效应与接触压力分布。为了能够使行波超声波电机输出大力矩，常需要在定转子间施加相当大的轴向预压力，会使定转子沿径向弯曲。由于径向弯曲的存在，定转子的实际接触面积大大减小，压力分布不均匀，使得定子转子的内径接触方向迅速磨损。大量的磨损是由于定转子接触界面积减小，局部接触压力过大引起的。而且，接触压力使得摩擦材料内部循环应力很大，造成极大的损耗和发热。

2）定、转子径向弯曲配合。由于定、转子径向弯曲效应的存在，需要适当地改变定转子结构设计，以配合径向弯曲效应，使定、转子能够平行接触。定、转子的径向弯曲配合能够增加接触宽度，使接触压力沿齿的整个径向距离均匀分布，极大地降低了局部接触压力，显著地减少材料磨损。另外，在保持周向接触比和压力不变的情况下，增加接触宽度，能够使加到转子上的周向预压力显著增加，因而能够使径向压力分布均匀，在不增加局部压力和摩擦层磨损率的情况下，提升电机的机械性能。

图 5.18-19 为系列 RTWUSM 转子剖面图。P. Le Moal 等对 30mm 转子结构弯曲配合进行了实验研究，结果表明该转子结构能使磨损均匀分布在整个接触区域，由于局部接触压力降低，摩擦层的损耗减小，大大降低了摩擦层磨损。

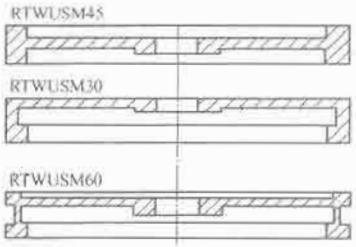


图 5.18-19　系列 RTWUSM 转子剖面图

由于实际的径向弯曲位移（70μm）都远远大于定子弯曲振动的位移（40μm），故可忽略行波的影响，对定、转子作静态的弯曲配合设计。

首先，单独处理定子，如图 5.18-20（a）所示，将虚拟的沿接触面均匀分布的载荷加在定子表面上，将定子相对转子的位置外移，计算定子的弯曲角度 α_s，以达到定转子弯曲配合。

其次，单独处理转子，如图 5.18-20（b）所示，将外加载荷加到转子下表面，求解转子的弯曲角度 α_r，并调整转子的结构参数，使其弯曲角度满足 $\alpha_s = \alpha_r = \alpha_0$，即完成了转子的设计。

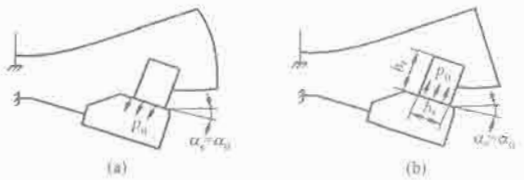


图 5.18-20　行波超声波电机转子的设计过程
（a）计算定子静态弯曲角度；（b）调整转子结构参数使弯曲角度与定子相同

由于定、转子的径向刚度可以用线弹性计算方式分别调整，并不取决于外部预压力情况，因而所设计的转子无论施加的预压力有多大，都能够满足定、转子的弯曲配合条件。设计过程中，可以使用有限元分析软件 ANSYS 进行参数的调整计算，也可以应用弹性弯曲公式进行分析求解。

4　行波超声波电机的驱动及控制

4.1　调速机理

超声波电机在实际使用时，必须通过驱动回路对电机进行调速，根据超声波电机的工作原理，可采用以下方式进行调速。

1）调压。改变驱动电源的电压可改变定子上行波的峰值，从而实现调速。

2）调频。超声波电机是在共振状态下工作，调频控制可迅速改变定子的共振状态，从而改变共振振幅，达到调速目的。

3）调相。改变两相驱动电源之间的相位差，可改变超声波电机定子表面质点的椭圆运动，从而实现调速。

4）正反脉宽调幅。调节超声波电机正反转脉宽的比例可实现调速。

几种超声波电机的控制方式的比较详见表 5.18-6。

表 5.18-6 几种超声波电机的控制方式的比较

控制变量		控制方法说明	特点		典型控制特性曲线图
			优点	缺点	
改变电压幅值	$A=B$，同时改变电压幅值	改变行波波动振幅	线性	调速范围小低速时转矩小、有死区	转速 O 电压
改变电压幅值	A B，改变电压幅值比	改变行波振幅和椭圆运动形状	线性	调速范围小低速时转矩小、有死区	转速 O 幅值比
改变相位差		改变定子表面质点的椭圆运动的运动轨迹	换向运动平滑，可实现柔顺控制	不容易实现低速起动	转速 O 相位差
改变驱动频率		通过调节谐振点附近频率控制速度和转矩	响应快、易于实现低速起动	非线性	转速 O 频率
改变通电时间	正反转脉宽调幅控制	通过调整正反转驱动时间占空比调速	转矩恒定调速范围宽，近线性	有调速效率及音频机械振动问题	转速 O 占空比
改变通电时间	断续驱动控制	低频断续驱动调速	转矩恒定调速范围宽，近线性	有切换噪声和机械振动	转速 O 占空比

注 A、B 分别为电机两相驱动电压的幅值。

4.2 驱动电路的实现

以推挽型电路为例介绍一种常用的驱动 RTWUSM60 行波超声波电机的驱动器的设计。驱动电源的技术要求如下：

1）二相输出为 40W。

2）二相输出电压有效值为 110V。

3）驱动频率 20～50kHz 可调。

4）二相相位差 90°。

5）要实现超声波电机的正反转控制。调频调速功能。

其系统结构框图如图 5.18-21 所示，驱动器分为振荡器电路、移相电路和功放电路三个部分。

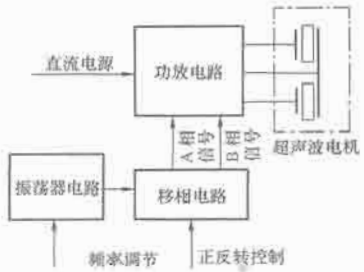


图 5.18-21 驱动器的系统结构框图

(1) 振荡器电路

振荡器电路如图 5.18-22 所示。该电路为典型的基于 NE555 多谐振荡器电路。该多谐振荡器电路输出频率波形的高电平时间为 T_1，低电平时间为 T_2，则

$$T_1 = 0.7(R_1 + R_2)C_2 \tag{5.18-38}$$

$$T_2 = 0.7R_1C_2 \tag{5.18-39}$$

周期 T_0 为

$$T_0 = T_1 + T_2 = 0.7(2R_1 + R_2) \tag{5.18-40}$$

时钟频率 f_0 为

$$f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{0.7(R_2 + 2R_1)C_2} \tag{5.18-41}$$

波形占空比 D 为

$$D = \frac{T_1}{T_0} = \frac{(R_1 + R_2)}{(R_2 + 2R_1)} \tag{5.18-42}$$

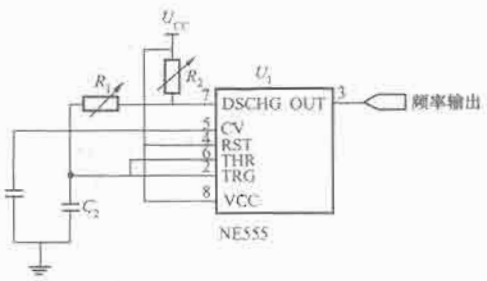


图 5.18-22 振荡器电路

通过适当调整电位器 R_1 和 R_2 的值就可以得到相应的振荡频率和占空比。由于移相电路的需要，振荡器频率应为超声波电机工作频率的 4 倍。

（2）移相电路

移相电路如图 5.18-23 所示，振荡器的输出频率作为双向移位寄存器 40194 的输入时钟。开关 SW1 实现正反转控制，驱动电路起动时 SW1 悬空，40194 的 S0 和 S1 端为高电平，40194 芯片将输入端 D0～D3 的电平信号装载到的输出端 Q0～Q3，则 G0～G3 的逻辑电平分别为 1000。当电机需正向转动时，开关接通 S0 端，在时钟信号的每个上升沿，移位寄存器的值向右移位，低位 Q0 值成为 SR 端口值，即前一个时钟的 Q3 值。G0～G3 作为推挽功放电路的输入，电机 A 相激励信号超前于 B 相激励信号 90°，电机正转，如图 5.18-24 所示。

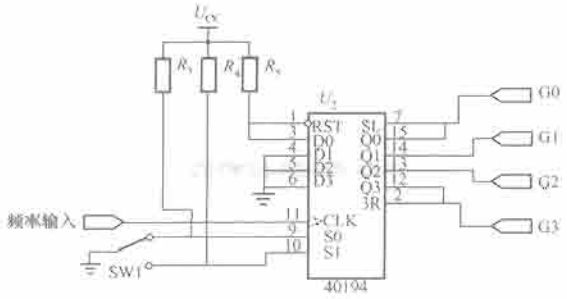


图 5.18-23　移相电路

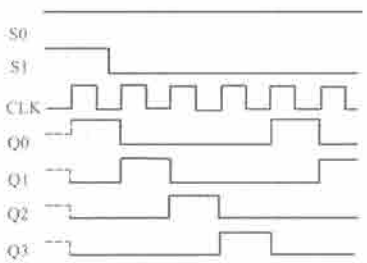


图 5.18-24　电机正转时序图

当电机反向转动时，开关接通 S1 端，如图 5.18-25 所示在时钟信号的每个上升沿，移位寄存器的值向左移位，高位 Q3 值成为 SL 端口值，即前一个时钟的 Q0 值。G0～G3 作为推挽功放电路的输入，电机 A 相激励信号将超滞后 B 相激励信号 90°，电机反转。

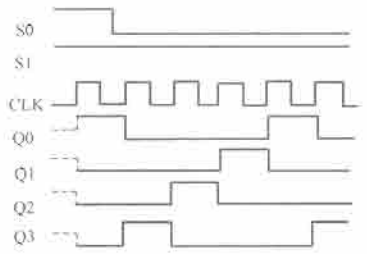


图 5.18-25　电机反转时序图

（3）功放电路

推挽式功放如图 5.18-26 所示，图中 G0 与 G2 为电机 A 相驱动信号，G1 与 G3 为电机 B 相驱动信号。以 MOSFET 管 VT9 为例，其栅源间的驱动电路由晶体管 V7、V8 组成的推挽电路构成。功率管选用 IRF530。

逆变电路的高频变压器铁心主要采用软磁铁氧体等高频低损耗材料。其额定电压不同于一般的工频电源变压器，它所承受的电压不是纯正弦信号，而是与工作电压波形有关。设计超声波电机高频变压器主要考虑工作电压波形、磁通密度的变化范围、传递功率等。

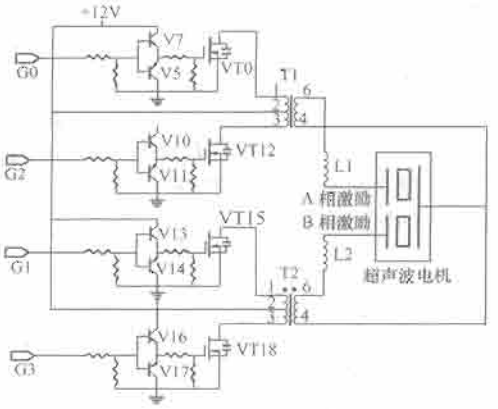


图 5.18-26　推挽功放电路

4.3　控制技术

4.3.1　速度控制

超声波电机工作时，电机利用压电陶瓷的逆压电效应，通过高频机械振动完成电能到机械能的能量转换。由高频机械振动引起的电机振动体分子间的摩擦产生热量，使电机温度升高，结构发生微观改变，导致电机共振频率发生变化，如图 5.18-27 所示，曲线 T_0 为起动时刻的电机阻抗相位—频率特性曲线，曲线 T_1 为电机温度升高后阻抗相位—频率特性曲线。当电机的共振频率发生变化后，因为超声波电机是在共振状态下工作，其运行特性也将发生变化。电机起动时，阻抗角—频率特性曲线为 T_0，电机初始工作在曲线 T_0 上的 Q_0 点，电机初始阻抗角为 ϕ_{ref}。当电机温度升高后，其阻抗角—频率曲线左移为 T_1，如果驱动频率不变工作点将变为 Q_1，定子行波的振幅将发生较大幅度的变化，电机的转速发生明显的改变。由于超声波电机运行时的转差率很高，定子行波速度远远大于转子转动速度，由驱动频率改变而引起的定子行波转速变化对转子转速的影响很小，如果能使工作点基本保持不变，即 $\phi=\phi_{ref}$，将驱动频率调整到 f_1，这时的工作点为 Q_0'。行波的振幅基本保持不变，就可以在恒转矩条件下保持电机的速度稳定。

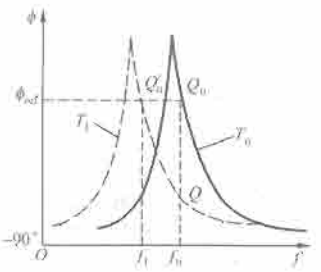


图 5.18-27　阻抗角—频率特性曲线图

速度稳定性控制的原则是：为了保持超声波电机的运行速度的平稳，克服电机温升造成的共振频率漂移，电机的驱动频率应紧紧跟随电机机械共振频率的变化而变化。电机的控制电路中通常采用利用孤极电压反馈的恒振幅控制或利用驱动电压与电流反馈的恒阻抗角控制两种电机速度稳定性控制方法，克服电机因谐振点的漂移而造成转速的变化。

（1）孤极电压反馈速度稳定性控制

超声波电机中利用孤极反馈信号，调整驱动频率使定子振幅基本维持不变，就可以在恒转矩条件下保持电机的速度稳定。孤极信号并不能直接反映电机的转速值，这种间接反馈量用于速度精确控制，效果并不十分理想，但它的反馈作

用简单可靠。

电路结构框图如图 5.18-28 所示，图中 U_f 为来自电机孤极，反映电机振动状态的直流电压信号，它是孤极产生与振动同频的电压信号经过滤波而得到的。当温度漂移时，U_f 值发生变化，它与 U_{ref} 的差值亦发生变化。经过单片机和驱动电路可重新调节超声波电机的驱动信号，以补偿因温度漂移而产生的转速偏差。

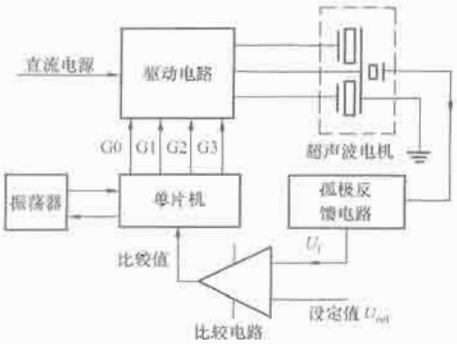


图 5.18-28 电路结构框图

1）硬件电路。微处理器接受经采样电路得到的孤极电压信号与设定电压 U_{ref} 的差值，该差值经过处理后，传输给产生频率的振荡器，再进行驱动信号的频率调节，用以补偿因温度变化而造成电机运行速度的偏差。输出两相位相差 90°的两相四路脉宽调制信号到驱动电路。

孤极反馈部分是一个二阶 RC 滤波环节，把从超声波电机采集到的高频信号转换成与电机振动幅度成正比的直流电压。通过与设定电压比较，将比较信号传递给单片机，构成补偿控制系统。

振荡器采用 LTC1799 和外部调压电路构成单片机的外部频率发生器，它与单片机一起构成频率调节系统，完成了超声波电机的转速稳定性控制。

驱动部分：驱动超声波电机需两相激励信号，单片机提供了两相四路 PWM 信号。

2）软件设计及孤极反馈控制算法实现。软件功能主要产生提供驱动电路的四路 PWM 波，处理从孤极反馈来的信号，调节工作频率，实现速度的稳定控制。其程序框图如图 5.18-29 所示。

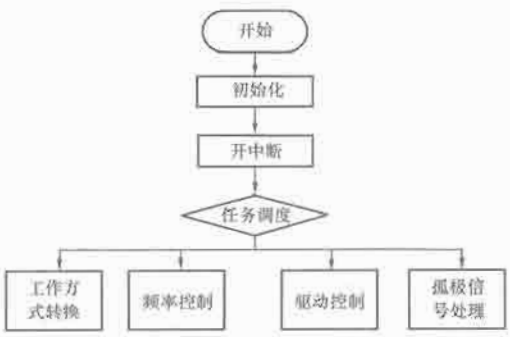


图 5.18-29 程序框图

超声波电机的共振频率随环境温度发生漂移，为了补偿电机转速因这种漂移所造成的偏差，控制器把电机孤极产生的振幅大小与定子振动幅值相关，并与振动同频的反馈电压直接采集进来，把它转换成一适当大小的直流电压。该电压与设定值相比较得到差值，根据差值实现变频及自动频率跟踪的功能。

3）系统的孤极反馈对电机运转特性的影响。RT-WUSM60 电机控制电路不加孤极反馈和加孤极反馈的速度稳定性测试曲线，如图 5.18-30 和图 5.18-31 所示。

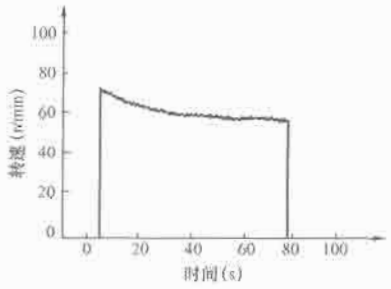


图 5.18-30 不加孤极反馈电机起动至稳态过程

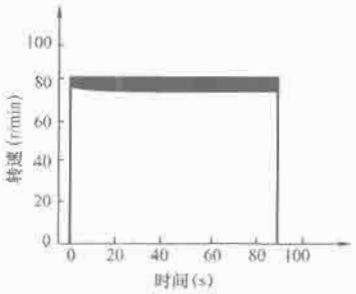


图 5.18-31 加孤极反馈电机起动至稳态过程

不加孤极反馈时，电机起动后，因电机定、转子之间的摩擦等因素，电机温度上升，共振频率下漂，转速会慢慢下降。当温度上升到一定稳定值后，共振频率稳定，转速停止下降。加孤极信号反馈后，当温度上升共振频率漂移时，电机振幅减小，孤极信号经采样滤波后得到的反馈信号直流电压下降。反馈信号与设定值比较，其差值经单片机的算法处理，用来调整驱动频率。使温度变化导致的电机特性漂移得到了一定补偿，因此速度下降幅度减小。

孤极反馈信号对电机转矩与转速特性的影响如图 5.18-32 所示。

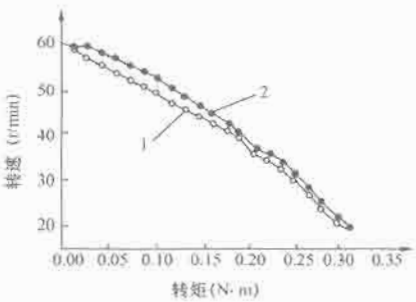


图 5.18-32 转矩—转速特性曲线

不加孤极信号反馈时，当电机加负载后，得到曲线 1，转速随负载的增加而下降；加孤极信号反馈后（见曲线 2），在同样负载条件时，转速略有上升，体现了孤极反馈对转速下降的补偿作用。

（2）电压与电流双反馈速度稳定性控制

驱动电压与电流反馈式速度稳定性控制系统如图 5.18-33 所示，系统由驱动电路、移相电路、电压传感器、电流传感器、频率跟踪电路等组成。系统通过 ϕ_{ref} 设定电机的运行工作点，频率跟踪电路接受超声波电机的一相驱动电压 U_A 和该相驱动电流 I_A 信号作为反馈量。两个量

通过鉴相器和低通滤波器产生能反映当前驱动频率下电机阻抗角 ϕ 的电压模拟量。该模拟量同反映 ϕ_{ref} 的另一个模拟量相比较，得到差值 $\Delta\phi$。利用 $\Delta\phi$ 来改变压控振荡器的控制电压，调节其输出频率。压控振荡器的输出频率经过移相器产生两相四路正交的 PWM 波 G0、G1、G2、G3。PWM 波经驱动电路升压及功率放大后驱动电机，使电机稳定运行。

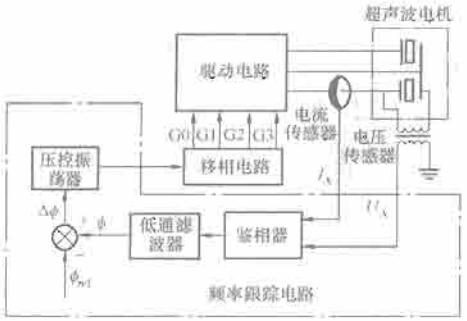


图 5.18-33　驱动电压与电流反馈式速度稳定性控制系统框图

频率跟踪电路如图 5.18-34 所示，它以 4046 锁相环芯片为核心、包括鉴相器、压控振荡器等功能。鉴相器利用 4046 的相位比较器工作方式 1 实现的，VA′和 IA′在 4046 中作异或运算，输出值经由电阻 R_3 和电容 C_2 组成的低通滤波器，生成能反映电机阻抗特性角 ϕ 的电压量。反映 ϕ 的电压与利用电位器 R_4 设置的能反映 ϕ_{ref} 的电压经过比较器 U2B 相比较，产生反映 $\Delta\phi$ 变化的可变电压。利用该可变电压控制 4046 中的压控振荡器的输出频率，使由该振荡频率四分频产生的电机驱动频率跟随电机共振频率的漂移而变化。

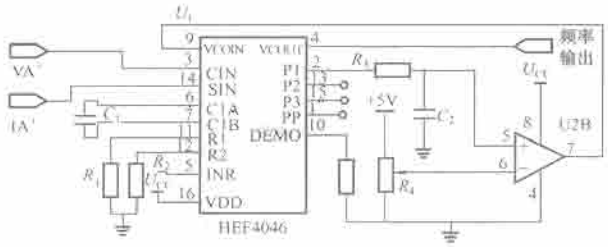


图 5.18-34　频率跟踪电路

驱动电压与电流反馈式速度稳定性控制系统结构比较简单，尽管以上分析是针对行波超声波电机的，但由于其只需采集一相的电压和电流信号，且无需改变电机的结构，所以更适宜在纵扭型等结构上不易设置孤极的超声波电机的速度稳定性控制中采用。但由于驱动电压与电流反馈式速度稳定性控制所采用的反馈量并不直接反映电机的转速值，控制效果很大程度上取决于对电机阻抗特性与温度的变化规律的掌握。

4.3.2　定位控制

由于行波超声波电机利用摩擦传动，本身具有断电自锁的功能，所以电机定位前要求工作速度较低，才容易达到定位的要求。可采用常规 PID 调节器，适当的调节参数，以确保定位的快速性与精确性。由于通过调节两相的相位差，可以轻易地实现电机的正反转运行，并且能够相对平稳过渡。

不同负载下超声波电机的调相曲线并不相同，如图 5.18-35 所示不同负载下的调相调速曲线，负载越大速度越低，当两相驱动信号的相位差接近零度时，调相的死区也越大。当电机进行定位控制时，电机的驱动频率固定。驱动频率过低，使得相位差很小将造成运行过大；当驱动频率过高时，电机的抗扰动能力和负载能力变差。

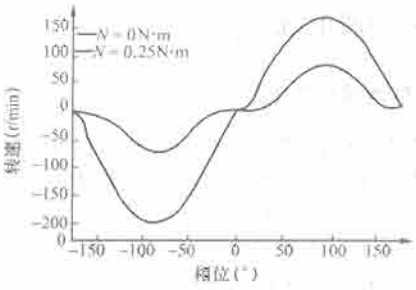


图 5.18-35　不同负载下相位速度曲线

对超声波电机进行 PID 调节定位控制，电机以 80r/mim 旋转 20 圈，空载下，得到如图 5.18-36 所示曲线。0.2N·m 负载下，得到图 5.18-37 所示曲线。

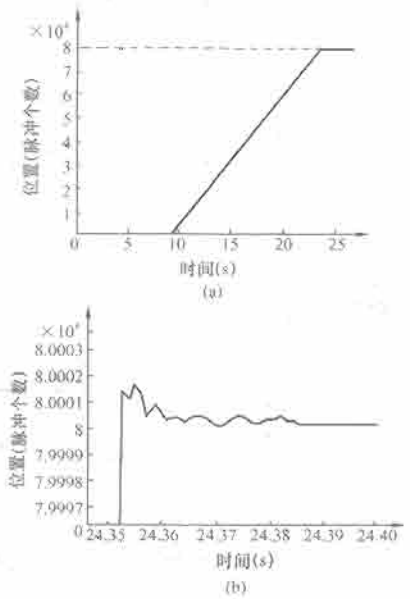


图 5.18-36　空载 20 圈定位控制曲线

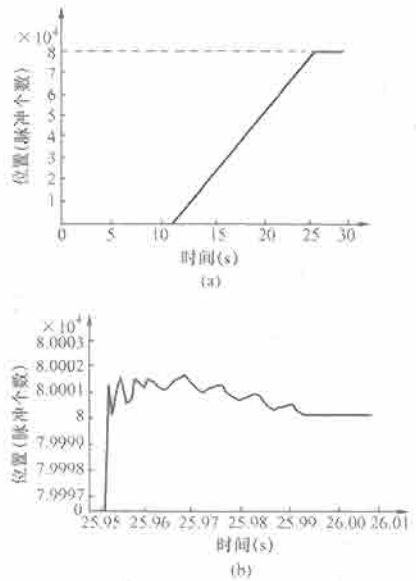


图 5.18-37　0.2N·m 负载 20 圈定位控制曲线

由图可知，电机旋转到了设定位置之后会有过冲，利用PID算法调节，可以把过冲的部分调节回来，达到精确的定位控制。

5 其他超声波电机

5.1 步进超声波电机的运行机理

步进超声波电机的运动机理来自于驻波声场中的小颗粒总是聚集于驻波波节处的现象。步进超声波电机定子一般为圆环，其背面粘有同向极化的压电陶瓷片，带突齿的转子压在定子上，突齿均匀分布，齿的顶端与定子接触。为便于分析，利用圆环振动的基本特性，可将电机沿陶瓷片分区交接处割开，展成自由支撑的直梁，如图5.18-38所示。

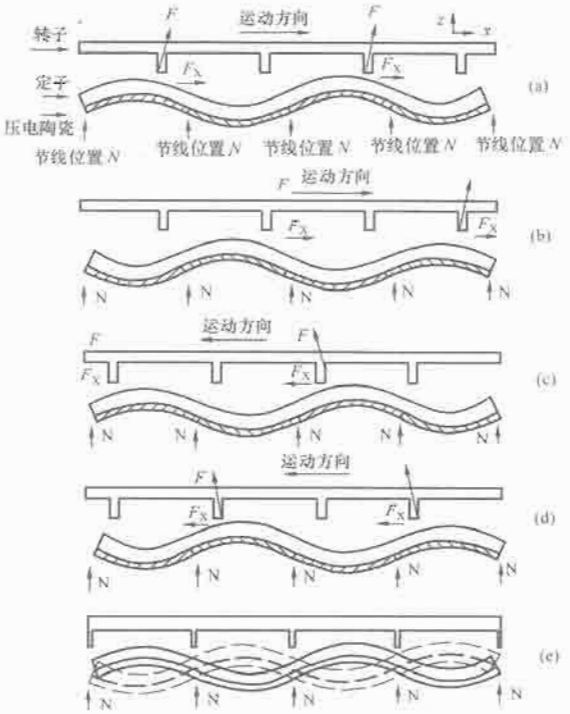


图5.18-38 步进超声波电机的运动情况

图中，压电陶瓷为交替极化。当压电陶瓷全部接上电压信号且驱动电压频率为定子 B_{02} 阶共振频率时，在定子上产生的驻波节线的位置用 N 表示。图5.18-38（a）为转子处在某一位置时，转子的齿为弯曲振动的定子表面接触情况。由于定子的弯曲振动，转子上隔开的两个齿与定子接触，受到力 F 的作用。力 F 的水平分量 F_x 作用在转子上使转子向右移动，即转子的齿向节线方向移动。在定子振动的负半周，如图5.18-38（b）所示，转子的位置与图5.18-38（a）相同，此时隔开的另两个齿受到与图5.18-38（a）同样方向的力的作用，也将推动转子向节线处移动。图5.18-38（c）、图5.18-38（d）为转子在节线另一边时，在定子振动的正、负半周，转子在力 F 的作用下向左移动，即转子上的齿向节线处移动的示意图。当转子上的齿在定子振动节线位置时，转子的位置保持不变，如图5.18-38（e）所示。

结果证明，超声波电机可利用驻波声场中小颗粒向节线处移动的机理，使转子上的突齿移动到节线位置，在定子适当的激振条件下改变节线的位置，可使转子有规律地产生步进运动。

5.2 弯曲振动超声波电机

从1992年开始，照相机对焦系统逐步应用小型圆柱定子超声波电机替代了环形超声波电机，这表明了圆柱定子超声波电机在相关产品的小型化应用领域的生命力。环行行波超声电机在小直径（小于20mm）条件下，输出性能逐渐失去低速大扭矩的特点，而且由于其结构的限制，效率也很难提高。为满足特殊的控制装置对电机体积和性能的需要，设计了一种纵向长度更为短小的柱体行波型超声电机。如图5.18-39所示该电机设计的结构图，定子采用兰杰文振子，变截面型式，由螺杆把定、转子金属弹性体和二组四片压电陶瓷元件及电极片连接在一起。定子的这种设计使得压电陶瓷不需黏结，激振效率高，工艺简单。压电陶瓷元件同样利用纵向效应来激励电机定子的振动模态，所使用的压电陶瓷为环状。

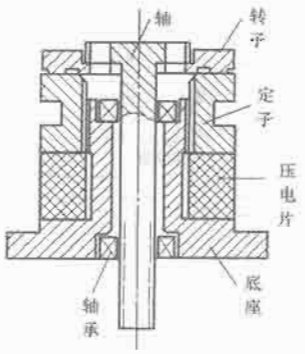


图5.18-39 短圆柱定子型超声波电机结构

该电机与一般的圆柱定子柱体超声电机有两个方面的区别：一是它的纵向长度小，振动体部分长度与直径接近；二是一端固定。

短圆柱定子超声波电机在空间互差90°安放的两相压电陶瓷片中通入时间上互差90°的两相超声频率交流电，从而产生两相弯曲振动驻波，合成这两相弯曲驻波，将在定子表面形成行波。定子表面质点形成椭圆运动，从而驱动压在定子表面的转子旋转，如图5.18-40所示。交换两相激励电源的相序同样可改变电机的旋转方向。



图5.18-40 摇摆运动原理图

5.3 纵扭复合振动超声波电机

圆柱定子纵、扭复合型超声波电机的驱动振子利用螺栓紧固的兰杰文振子构成纵、扭复合型驱动振子，分别产生纵向和扭转振动，其基本结构如图5.18-41所示。用螺栓夹紧3个金属块间的纵振陶瓷片和扭振陶瓷片，充分利用压电陶瓷的抗压性特点，使振子产生较大的扭矩，提高振子的机械转换效率。

为了提高激振效率，对纵振陶瓷片在 x_3 方向上对进行极化并加电场，就能得到该方向的伸缩变形，如图5.18-42（a）所示。一般极化整个环状扭振压电陶瓷较困难，可将其分为多个扇块，如图5.18-42（b）所示。假如每个扇块的上下表面都能产生沿直线方向的剪切力，多个扇块产

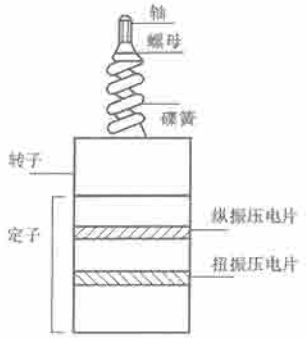


图 5.18-41　圆柱定子纵、扭复合型超声波电机的基本结构

生的剪切力就可以近似成圆周方向的剪切力，扇块分得越多，扇面产生的剪切力就越近似等于圆周方向的剪切力。实际设计时，定子尺寸越大，要求扇面数越多，但扇面数越多，装配越困难，一般可根据具体的要求选择合适的扇面数。

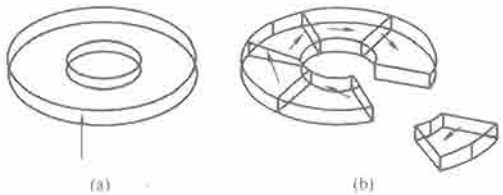


图 5.18-42　压电陶瓷的极化方式
(a) 纵振陶瓷片的极化；(b) 扭振陶瓷片的极化

作为定子的扭转振子和纵向振子，可以分别独立激励扭转振动和纵向振动。一般扭转振动和纵向振动的共振频率相差较大，工作频率为扭转的共振频率，但通过采用适当的结构和电机尺寸，可以使纵振、扭振频率接近一致。驱动振子在一个运动周期中 4 个特殊的时刻状态的运动如图 5.18-43 所示。

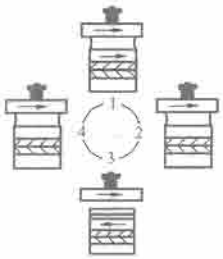


图 5.18-43　圆柱定子纵、扭复合型超声波电机的运动原理

时刻 (1)：扭转振动速度达到最大，扭转振动的位移为零，同时纵向伸长并紧紧同转子相接触，扭转的驱动力被传到转子上，转子逆时针方向旋转。

时刻 (2)：振子扭转振动的位移达到最大，扭转振动速度为零，纵向振动速度达到最大，纵向长度回复到原位。振子在产生驱动作用后开始同转子脱离，转子靠其惯性，继续逆时针转动。

时刻 (3)：扭转振动速度方向与转子运动方向相反，振子纵向位移变为负值，纵向缩短。转子同驱动振子脱离，转子由于本身的惯性继续逆时针运动。

时刻 (4)：扭转振动的振幅达到反向最大，振子开始逐渐伸长，定子和转子将开始接触。

时刻 (5)：振子又回到 (1) 时刻的状态，结束一个周期的运动。

由上可知，圆柱定子纵、扭复合型超声波电机利用扭转换能器在共振条件下产生大扭矩，利用纵向传动器控制摩擦力工作的。如果纵向和扭转激振力的相位差为 $-\pi/2$，则电机反向转动。

5.4　球转子多自由度超声波电机

利用单个圆柱形结构做成压电超声波电机的定子，通过对定子的振型设计、压电陶瓷的极化与配置的设计，并通过驱动控制电路使定子表面质点产生三自由度椭圆运动，从而实现球形转子的三自由度旋转，可以从根本上缩小球形电机的体积，突显超声波电机结构紧凑、低速大扭矩、可直接驱动负载和定位精度高的优点。

图 5.18-44 为所研制的三自由度超声波电机整机照片，转子是球形，定子采用兰杰文型式，即螺杆把金属弹性体和三组六片压电陶瓷元件及电极片接在一起。定子的这种设计使得压电陶瓷不需黏结，具有激振效率高，工艺简单，且定子直径越小，弯曲摇摆振幅越大的特点，装配图如图 5.18-45 所示。压电陶瓷元件利用纵向效应来激励电机定子的振动模态，所使用的压电陶瓷为环状，如图 5.18-46 所示。纵振动压电陶瓷为均匀厚度方向极化，弯曲振动压电陶瓷电极分割为两部分，并且相互反相极化。6 片压电陶瓷按极性相反两两叠合成一组。为了激励两个正交的弯曲振动模态，两组弯曲振动陶瓷环空间放置相差 90°。即 A、B 两组压电陶瓷元件激发弯曲振动，C 组压电陶瓷元件激发纵向振动。从理论上看，质点的弯曲振动与纵向振动的合成可以形成质点的驻波，两个弯曲振动可以合成为行波，这从后面的有限元计算、运动机理的理论推导和实验均可以得到验证。

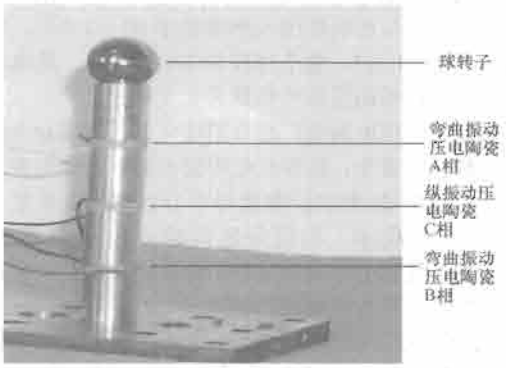


图 5.18-44　实物照片



图 5.18-45　装配图

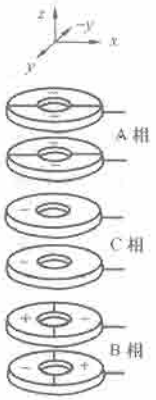


图 5.18-46　压电陶瓷极化图

6 制造及试验

超声波电机的驱动原理与电磁电机的完全不同，但是从电机的驱动形式上来看，两者也有相似性。同样，超声波电机的性能参数与传统电磁电机参数的测试既有相似又有别于一般的电机测试技术。虽然目前国内外有许多高校、研究机构陆续投入到这一高新技术中来，但国内还没有完全商业化的应用产品，公认的原因之一是国内的原材料、制造工艺达不到要求，并且缺乏先进的控制手段。

6.1 制造技术

6.1.1 工艺流程

超声波电机的工艺流程一般包括以下步骤：

定子：压电陶瓷环＋弹性体：（黏结）→传动面研磨→引线→定子。

压电陶瓷环：压电材料取材→切去内外圆周成环形→电极分割→极化处理。

弹性体：弹性金属材料取材→切削加工→热处理→时效处理→黏结面研磨。

转子：转子材料取材→切削加工→黏结摩擦材料→研磨→转子。

定子＋转子＋轴承＋弹簧＋轴＋垫圈＋外壳→完成超声波电机组装→时效处理。

6.1.2 工艺要求

1）压电陶瓷环。压电极板两边敷有银电极。将压电陶瓷极板切去内外圆周，得到压电陶瓷环，由研磨切割轮磨去部分敷银层，分割电极，或在敷银时用丝网印刷的方法分割电极。极化装置与压电环浸入绝缘油中 80～100℃，施以高压（约 4～5kV/mm），整个过程需 10～15min。具体的极化过程、方法及使用的设备可参见有关文献。

如果使用的压电陶瓷已经分割极化好，就需对压电陶瓷进行性能检验。首先，观察压电陶瓷表面，去除有裂纹的陶瓷片，然后使用 d_{33} 测试仪测量每个分区的压电系数，要求满足 $d_{33}>250$pC/m，不同分区间的压电系数差值应在±10%之内；使用电容表测量每个分区和每相的电容，要求选择两相电容一致的压电片。

2）定子。定子弹性体的加工需要注意关键尺寸精度的把关。为了保证定子的对称性，振动体的两个平面间的平行度应在 0.01mm 以上。定子弹性体加工处理后，需要按照所选材料进行适当的热处理和时效，以消除热应力和内部应力，使超声波电机定子振动性能可长期稳定。黏结压电陶瓷面使用 12μm 的氧化铝砂进行研磨，最大平面度偏差要小于 15μm。同转子接触的平面要求平整度相差在 1.5μm 以内，研磨平面粗糙度小于或等于 0.4μm。

3）转子。考虑到转子柔性和超声波电机工作寿命等方面，需要对转子表面进行特殊氧化。转子黏结摩擦材料后，要对同定子的接触面进行研磨和抛光，使表面平面度相差在 1.5μm 以内，表面粗糙度小于或等于 0.4μm。

4）定转子接触面。为了能够使定子振动能有效地转化为转子的机械能，需要对定转子接触表面提出很高的要求。其平面度、表面粗糙度关系到噪声、能量转化效率、运转平稳性等性能。定转子必须保持面面接触，使预压力在整个接触面上均匀分布。接触面的表面粗糙度及平整度的高精度要求是必不可少的。参见上述对定子弹性体和转子的工艺要求。

5）弹簧和轴承。考虑到电机的质量、体积及紧凑性，常选用碟簧来施加定转子间的预压力，也可以采用将碟簧和转子合成一体的型式。轴承要选择精密的油封轴承，以确保电机的寿命和运行性能。

6.1.3 黏结过程

超声波电机定子同压电陶瓷的黏结是电机制造过程中的关键技术，它关系到电机的最大输出功率、效率和疲劳寿命。一般要求压电陶瓷同定子弹性体间有良好的电接触，要求黏结层机械阻尼损耗低、动静态剪切强度高、耐腐蚀等。最佳的黏结方法往往作为商业秘密、很少公开。参考应变式传感器和超声换能器的黏结方法，可以得到非常好的黏结效果。

通常采用环氧胶来黏结压电陶瓷与定子弹性体。环氧导电胶能够实现良好的电接触，但其黏结层厚度必须大于导电粒子的大小，否则无法形成薄的刚性黏结层。通过增加定子表面粗糙度可使定子表面凹凸穿透胶层，同压电陶瓷电极进行直接的物理和电气接触，同时可以保证很薄的黏结层，实现低阻尼损耗的刚性连接。工艺流程为：表面处理→涂胶→固化。

1）表面处理。主要去除污物及疏松层，增加接触面积和提高表面能。可使用砂纸打磨或干法喷砂研磨表面，得到表面粗糙度 R_a 2～3μm。然后进行表面清洁，使用能够溶解不同油脂的化学清洁剂，用脱脂棉擦洗或进行超声清洗。清洗后的定子要避免外界污染，应尽快进行黏结。对压电陶瓷片的表面要稍微打磨，并使用清洁剂擦洗。

2）涂胶。若用 A、B 两个组分的环氧胶，按照说明仔细称量后混合，搅拌 2min 后，进入真空室去除气泡 1min，将少量环氧胶通过吸液管在定子表面滴 5 到 6 滴，使用一刷刀片沿整个面积均匀涂覆，使环氧胶层刚好覆盖定子的凹凸表面。通常在压电陶瓷的黏结面也进行涂胶，然后将定子弹性体和压电陶瓷装配在夹具上。

3）固化。胶层的固化需要施加一定的压力，以确保胶能够在黏结表面流动并深入粗糙的凹凸部，以形成牢固的黏结。施加压力要根据胶粘剂的要求，一般为 1～10N/mm²，将夹具放入烘箱，按照胶的固化工艺，以 80～100℃保持 1～2h，采用真空固化可能得到更好的黏结效果。

6.1.4 引线过程

超声波电机的激励常由连接在压电陶瓷元件电极上的引线输入。引线方式有两种：焊接和黏结。焊接时，压电陶瓷电极表面应无油脂和灰尘，烙铁的温度应该低于 250℃。焊接时间要尽量的短，选用直径 0.2mm 的焊锡丝，焊接点直径应小于 3mm。焊接引线的方式比较灵活，但若处理不好，容易引起电极面银层的破坏或者由于焊接温度过高引起压电陶瓷局部退极化，故一般要采用黏结方式，使用导电环氧将引线连接到电极面上。一些商业化的超声波电机中都使用黏结的方法，即用柔性 PCB 板来完成压电陶瓷各分区的连接。

实际制造工艺中，RTWUSM30 使用了柔性 PCB 板黏结引线的方法；RTWUSM45、60、100 使用了焊接引线的方法。

6.1.5 装配过程

由于超声波电机定子表面振幅只有几个微米，因而定转子配合、轴和转子的连接、预压力施加装置的配合等装配过程引入的误差都会导致电机效率的下降，机械摩擦噪声及转动不平稳等问题的出现。

其中，转子和轴的连接有较高的垂直度要求，必须在相应的工装夹具上进行。定转子的配合必须保证是面面接触，而且接触压力均匀分布，定转子接触的偏差应该在碟簧等预压力装置可细微调整的范围内。

6.1.6　时效处理

装配完成后，要对超声波电机整体进行连续运行、循环正反转切换运行一段时间，以使黏结层内部应力释放，各种阻尼及物理限制减弱，接触界面进一步磨合，从而使电机的运行性能进入稳定运行状态。

6.2　测试技术

超声波电机利用压电陶瓷的逆压电效应和超声振动，通过摩擦来驱动。由于其不利用磁场来传递能量，超声波电机各种参数的测试有别于传统电磁电机的测试技术，要得到优良的控制性能，必须测试超声波电机模态特性和输出特性，它是实现各种控制策略的先决条件。

传统的电磁电机的等效电路参数可以通过短路和空载试验获得，其测试技术已很成熟，但超声波电机是一种新原理的电机，其性能和输出特性的测试就具有自己的特点。超声波电机的起动和停止时间基本是毫秒级的，若将传统的电磁电机测试技术应用在超声波电机上，将捕捉不到其瞬态响应，测试出的等效电路参数误差很大，无法用于参数辨识和控制策略设计，因而也就无法对超声波电机进行跟踪反馈控制。以系列 RTWUSM 为例，分别测试了自由定子的阻抗，定子的振动模态以及超声波电机输出特性，与国外测试设备相比，性价比较高。还验证了当激励振型与压电陶瓷设计的实际振型一致时，能得到最佳的转矩—转速输出及能量转换效率，超声波电机的输出特性测量中必须使用刚性联轴器等重要结论。

6.2.1　自由定子的阻抗测试

超声波电机定子的电阻抗特性能够综合反映定子压电振子的性能指标，而且通过其阻抗特性的测试，能够估算定子等效电路的元件值，从而对超声波电机性能进行预测和评估。

（1）定子的静态测试

静态阻抗测试主要测量压电陶瓷和自由定子的静态电容。对黏结好的定子，首先用电容表或低频交流电桥测量 A、B 两相的夹持电容，可粗略判断 A、B 两相或者 A、B、C 三相是否对称。若黏结层中存在大量的气泡或压电陶瓷片已经破裂或破损，两相电容就会相差很大，会造成定子两相严重不平衡。两相误差超过±20%，该定子必须淘汰，不必再进行下一道工艺，因为它无法激励出足以驱动转子负荷的行波。

（2）自由定子的动态阻抗测试

1）动态阻抗测试的原理及方法。测试超声波电机动态参数，国外多采用阻抗分析仪（HP3562、HP4192、HP4294），结合 HPVEE5.0 开发的测试程序，在定子振动表面黏结加速度传感器来拾取振动信号，通过 GPIB 控制，自动测量定子的阻抗特性，并将结果储存在 PC 机上，并显示输出波形。该输出波形对于谐振频率的获取、等效电路的导出、参数的识别及相应的控制策略的确定均有重要意义。利用 HP3562 动态信号分析仪的定子测试如图 5.18-47 所示，施加单相电压激励后，可在定子振动表面的加速度传感器可拾取振动信号，频率在 1～2MHz 之间变化，分别测量输出电压和输出电流，通过自带的程序，可根据用户的要求分别测出阻抗的实部和虚部、幅值和相位角。BT-4 对超声波电机定子进行阻抗特性扫频测试的结构如图 5.18-48 所示。BT-4 使用了定子压电陶瓷上的反馈电极拾取信号，采用单相激励，频率在 1～60kHz 之间变化，分别测量输出电压和输出电流，可以通过对显示屏的拍照等来进行数据存储。

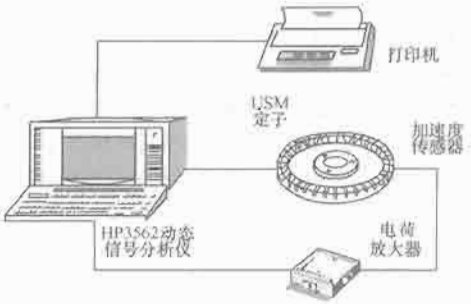


图 5.18-47　自由定子 HP3562 测试图

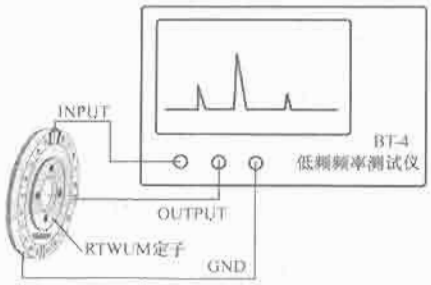


图 5.18-48　自由定子 BT-4 测试图

2）阻抗自动测试系统。实际样机的批量制作或产业化工艺中，虽然采用 BT-4 测试的成本较低，但由于图形和数据的输出操作不方便，且对相位分析不能随时跟着激励电压的变化而实时输出并显示。本课题组开发了一套基于 LabVIEW 和 GPIB 通信的阻抗自动测量系统，性价比优越，如图 5.18-49 所示。

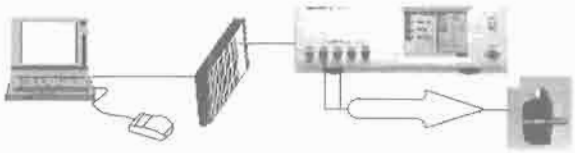


图 5.18-49　定子阻抗测试框图

6.2.2　压电陶瓷参数的测量

衡量压电陶瓷的介电、压电特性主要有温度特性、稳定性、机电耦合系数、机械品质因数。而这些参数分别是介电常数 $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$，介质损耗角 $\tan\delta$，杨氏模量 E_{11}^E，E_{33}^E，压电常数 d_{33}，d_{31}，泊松比 γ，机械品质因数 Q_m，居里点 T_c，密度 ρ_D，机电耦合系数 k_{31}，k_{33}。但在一般的超声波电机制造中，主要检测其中的两个参数：d_{31} 和 Q_m。有条件时还可以测量压电陶瓷的机械品质因数 Q_m，一般设计压电陶瓷时就可以计算出大概的 Q_m 值。

6.2.3　定子的振型和振幅测量

压电晶体中能被外电场激励的振动模态，必须有适当的机电耦合途径，即把电场能转换成与该振动模态相对应的弹性能。如果沿着压电体的某一方向施加电场，在线性理论的范围内，即可以根据与该方向相关的非零压电常数，来判断何种振动模态有可能被激励。

通过对阻抗的测试可以获得定子振动的谐振频率，但却无法获知实际工作的振型，当定子不在所设计的振型激励时，定子中损耗很大，导致效率和输出功率下降，而振型测量有助于决定定子的激励。超声波电机定子的振动测量多采用加速度传感器、激光多普勒测振和电子散斑测振，这些仪器主要测量振型和振幅。

国外的研究中多使用加速度传感器和激光多普勒测量振型，它通过控制激光束对整个定子区域扫描振动模态，并用图形显示收到的速度或幅值信息。除了能够给出谐振的振动模态外，还能够测量定子振动的振速，给出定子位移和速度的详细分布情况，能获得自由状态和夹持状态下定子的振动幅值，可用于研究定子振动特性随驱动电压频率的变化情况。

另有一种电子散斑测振，它具有全场实时测量、非接触、精度高等特点，能在一次测量中获得整个物体的位移分布，实时显示物体的振型，设备对被测物体不存在附加质量影响，通过计算还能定量分析振动体各点的振幅。但它只能测垂直于被测表面的振动位移，作为实际超声波电机的样机制作中正好与理论分析的假设条件一致。

6.2.4 转子预压力测量

超声波电机是由摩擦力转换成驱动力的，根据定转子界面的状态、材质、形状的不同，转子速度和驱动力之间有着各种各样的特性关系。根据库仑法则，对于滑动摩擦，认为摩擦力和预压力成正比例；伴有滑动的转动摩擦中，可以认为摩擦力和滑动成比例。因此，转子预压力的大小对超声波电机的输出性能有着极大的影响。

6.2.5 性能测试

超声波电机的输出性能测试是设计、制作和检验超声波电机是否实用的最根本的依据，是对超声波电机驱动控制技术及控制策略选择正确与否的最终检验，也是超声波电机一旦产业化后提供给用户的最终技术指标。超声波电机的性能测试包括稳态测试和动态测试。稳态测试主要就是高频功率的测试和机械特性的测试，动态测试则包括电机的起动、停止特性的测试。经过前面对超声波电机的所有部件的逐一测试合格后，按照一定预压力装配成型，就可以进行一系列性能测试实验和数据处理。

（1）稳态性能测试的联机自动测试系统

由于超声波电机的工作频率一般都大于20kHz，普通的直流功率表无法直接测量超声波电机的输入和输出功率，而高频功率表的测量频率最高可达1MHz，可直接测量超声波电机的两相输入功率和电机的输出功率，其负载转矩可通过磁粉负载施加，通过转矩转速传感器测定电机输出功率，可计算电机运行效率。超声波电机的效率测试系统原理如图5.18-50所示。当驱动器的输入与直流电源的输出相连，同时接至高频功率表，就可以测量驱动器的效率和整个超声波电机的效率，其测试原理如图5.18-51所示。

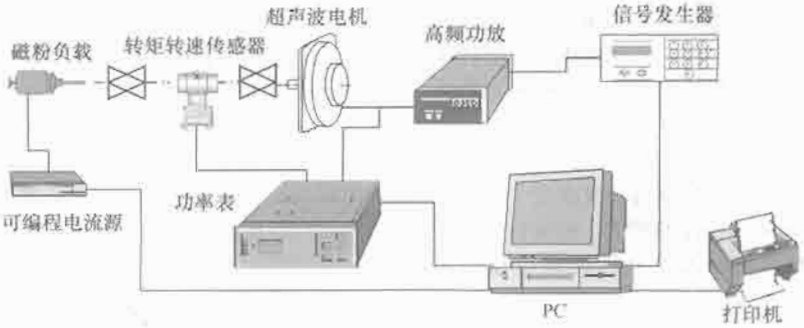


图5.18-50 超声波电机效率测试系统原理图

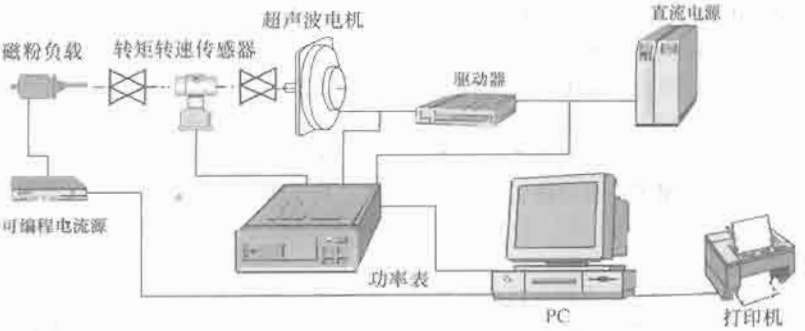


图5.18-51 超声波电机联机测试系统原理图

（2）超声波电机的机械特性测试

从驱动源来看，超声波电机与传统的电磁电机完全不一样，但从电机驱动的形式上来看，超声波电机与电磁电机又有许多的相似之处，如机械特性曲线是用户选择电机类型的依据。所谓机械特性就指输出转速 n 与负载转矩 T_L 间的函数关系 $n=f(T_L)$，寻找一种准确测试超声波电机机械特性的方法十分重要。

由于超声波电机具有低速大转矩、自锁力矩的特点，一般的直流发电机不适用于作为超声波电机负载。国内实验室常用弹簧秤加砝码、台式测功机和涡流测功机作为超声波电机的负载对其机械特性进行测量。本节机械特性的部分输出曲线通过转矩测量系统获得，施加负载转矩可调节磁滞测功单元的电流，输出的速度和位置信息可由测功单元中的编码器来获得。测量时需要选用刚性联轴器，并避免磁滞测功单元引起的电机转矩的脉动，测量范围是0.02～20N·m、转速范围是0～6000r/min，能基本满足现有超声波电机机械特性的测试。

（3）超声波电机的起动、停止特性测试

超声波电机的起动时间常在0.5～20ms之间，因而需要很高的采样速率，常需将电路控制和测量触发集成在一起，通过计算机来控制。实际上，计算机控制的瞬态测量平台也可用于快速的评估和实现超声波电机的速度控制和定位控制系统。

超声波电机的稳态特性也可通过对电机起停的瞬态响应测量获得。瞬时测量结果中包含静态的，且能够进行多项测试，以获得诸如摩擦层、驱动电压、预压力等参数变化引起

的效应。

考虑到成本因素、硬件资源和技术掌握的成熟程度，超声波电机测试系统的硬件结构采用模块化设计方法，主要模块包括测试板、控制板、转矩测试仪、可编程负载和光电编码器等几个部分，其测试原理框图如图 5.18-52 所示。计算机用于终端显示、控制以及最后的数据处理，是协调各个设备正常工作的核心部分。

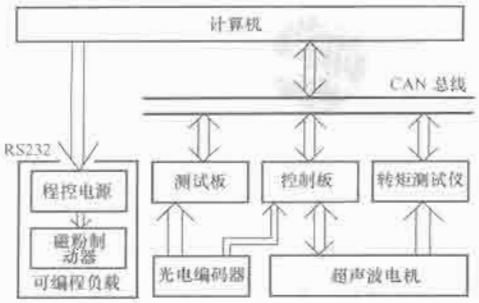


图 5.18-52　测试系统硬件结构模块框图

程控电源和磁粉制动器构成可编程负载，给超声波电机加模拟负载。计算机通过 RS232 向程控电源发送指令，设置负载值。测试板、控制板和转矩测试仪通过 CAN 总线与计算机连接。光电编码器通过柔性联轴器与超声波电机连接，它将电机的机械旋转转换成系列脉冲信号分别送至测试板和控制板。测试板接收到光电编码值后发送给计算机。控制板根据计算机指定的频率驱动超声波电机，并将当前电机运行频率值与转速值返回给计算机。转矩测试仪测出超声波电机的输出转矩，并将值发送回计算机。

6.2.6　噪声测试

由于实验中不同摩擦材料的样机及不同电机之间的噪声特性不同，为了便于比较，可使用精密声级计、活塞发生器及电容传声器对电机的噪声进行测量比较。为了更好地实现能量的转换，还需要对摩擦材料的摩擦系数以及耐磨性等参数进行必要的测试。在特殊的应用场合，还需要对压电陶瓷的机械品质因数及其他参数进行测量。

7　典型产品技术数据

东南大学联合国电南自生产的行波超声波电机的性能数据见表 5.18-7。

表 5.18-7　　东南大学联合国电南自生产的行波超声波电机的性能数据

性　能	RTWUSM30	RTWUSM45	RTWUSM60	RTWUSM100
驱动频率（kHz）	51	44	40	35
驱动电压（V·r·ms）	100	120	120	120
额定转矩（N·m）	0.06	0.10	0.5	2.0
额定转速（r/min）	150	80	60	45
输出功率（W）	0.9	1.5	4	6
堵转力矩（N·m）	>0.1	>0.3	>0.8	>3.2
空载转速（r/min）	250	180	130	60
定子外径（mm）	30	45	60	100
定子内径（mm）	20	31	44	74
驱动半径（mm）	13.3	20.0	28	48
振动模态	B_{05}	B_{07}	B_{09}	B_{011}

第 19 章 其他非传统电磁原理电机

1 静电电机

静电电机是利用静电驱动的电机。最早人们发明了利用同号电荷相排斥、异号电荷相吸引原理工作的静电电机。目前根据工作原理，静电电机可分为两种类型：即电容可变型静电电机及利用绝缘材料的介电驰豫特性工作的电压驱动型感应静电电机。

1.1 特点

静电电机具有以下特点：

1）静电电机结构简单，电极表面所产生的电场强度与电极的厚度无关，电极和配线的截面积可以做得很小。

2）静电电机的电场强度只受绝缘材料性能的限制，缩小尺寸并不影响电场强度，产生的力与表面积成正比。因此，小型化的静电电机的电场能量密度可与电磁式电机的磁场能量密度相比拟。

3）能量转换效率高。

1.2 制作技术

静电电机的制作技术有三种：

1）传统的机械加工手段（如金属与塑料部件的切削、研磨）。即利用大机器制造小机器，再利用小机器制造微机器的方法。

2）表面超微加工技术。利用牺牲层技术和集成电路工艺技术相结合对硅材料进行加工。

3）LIGA（光刻、电铸、塑铸）技术。它是利用X射线光刻技术，通过电铸成型和铸塑形成深层微结构的方法。这种方法可以对多种金属以及陶瓷进行三维微细加工。

随着硅集成电路技术和微细加工技术的高速发展，静电型超微电动机的研究得到了长足的进展。其中第二种方法与传统IC工艺相兼容，可以实现微机械和电子的系统集成，比较适合批量生产，已成为目前超微静电电机生产的主流技术。

1.3 工作原理

（1）介电驰豫原理

利用介电驰豫原理的静电电机一般被称为静电感应电机。其原理如下：如果将一个介电转子置于旋转电场中，就会在转子表面感应出电荷，由于介电驰豫，这些电荷滞后于旋转电场，这些感应电荷与旋转电场之间的偏移就产生了一个作用在转子上的转矩。如果转子由多种介质构成，那么不同的介电驰豫过程就会被叠加，在不同的频率下起作用。由于电机运行时，转子的角速度小于旋转电场的角速度，因此这种电机被称之为"异步"。电机的转矩与效率取决于转子角速度与旋转电场角速度的比。图5.19-1所示的是介电感应静电电机的示意图。电极静止排放，相差90°相角的两个电压用来产生旋转电场。

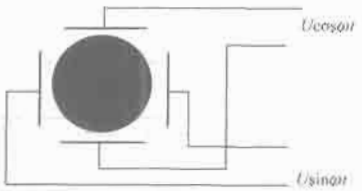


图5.19-1 介电感应静电电机的示意图

（2）电容可变原理

利用电容可变原理的静电电机就是指利用带电极板之间基于静电能量变化趋势产生机械位移。这种作用力使两个电极趋于互相接近并达到能量最小的稳定位置。电机的定子为静止电极，转子为移动电极，通过限制转子向定子方向移动的自由度，就可以使转子获得一个单一方向的位移。静电电机的电容可变原理以平行板电容为例，说明如下：

对中间带有绝缘层的平行极板电容器的两极板间施加电压U，则电容器的电能为

$$W_e = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S U^2}{2d} \tag{5.19-1}$$

式中，负号是考虑电压源能量损失的结果；S为极板的面积；d是两个极板间的距离；ε_0和ε_r分别是真空介电常数和相对介电常数。

如果要计算在任意一个方向的力，可以通过计算电能在这一方向上的负的偏导数得到。如图5.19-2所示，假如平行板电容器的两个极板在ω方向不完全对准，互相重叠x，则在这种情况下计算在ω方向的力为

$$F_\omega = \frac{\partial W_e}{\partial x} = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r l U^2}{d} \tag{5.19-2}$$

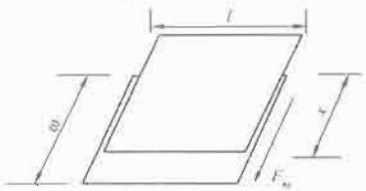


图5.19-2 相互重叠x的平行板电容器

如果上面的极板为固定端，下面的极板为移动端，那么这个平行于极板的力F_ω就会试图将下面的移动极板与上面的固定极板相互对准，从而产生了一个沿ω方向的运动。

式（5.19-2）表明，F_ω是与边缘长度l成正比的，考虑单位长度力f_ω，用这个量来衡量静电电机所产生的力

$$f_\omega = \frac{F_\omega}{l} = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r U^2}{d} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \varepsilon_r d E^2 \tag{5.19-3}$$

式中，$E=U/d$。

因此对于这类静电电机要获得较大的力，就要在保证绝缘材料不被击穿的前提下，尽可能地施加较大的电场，缩小定转子电极之间的间隙。

电容可变型静电电机通常采用梳状电极以增加作用面积和运动距离（见图5.19-3）。由于在静电力作用下有使电极间电容达到最大的趋势，因此可动电极会沿着梳状电极垂直方向插入固定电极齿隙中，形成垂直方向的合拢运动［见图5.19-3（a）］。当垂直方向运动受到约束时，也可以沿梳状

电极平行方向运动，形成齿顶对齐运动［见图 5.19-3（b）］。这两种工作方式可以应用于静电微电机。

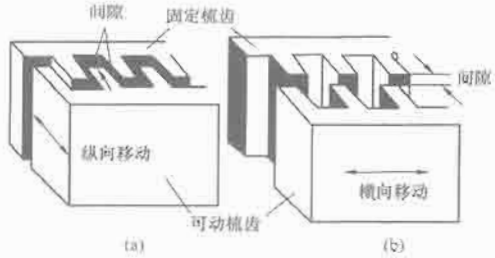


图 5.19-3　电容可变型静电电机工作方式

电容可变型静电电机的结构简单，由性能良好的绝缘体和导电体构成，它的激励只需要简单的开环电压脉冲就足够了。

1.4　分类

静电电机按其运动方式可以分为直线型和旋转型两大类，此外还有静电泵和静电阀等。

（1）直线型

静电直线电机的工作方式通常采用图 5.19-3（a）所示的梳状电极垂直运动，可以由一对梳状电极构成一维直线运动，也可以由两组甚至三组正交梳状电极构成两维或三维运动的直线电机。直线型静电电机结构简单，易采用多种制作方法和多种材料。

图 5.19-4 所示的是一种直线型静电电机的结构示意简图。定子和动子上都沉积有电荷，通过对定子与动子间施加一系列电压可以使动子产生直线运动。运动速度的控制可以通过调节电极上施加的电压来达到，采用矩形波电压驱动。

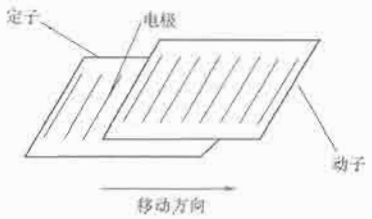


图 5.19-4　矩形波驱动直线型静电电机结构示意图

图 5.19-5 为采用表面微加工工艺制作的平面直线电机。该电机包括两对互相垂直的梳状电极，通过控制施加在两对梳状电极上的电压，可以使制作在电机中心的微探针沿 X、Y 方向运动。

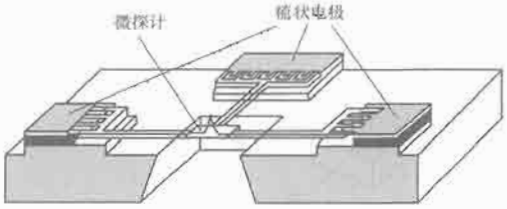


图 5.19-5　用于表面微加工工艺的平面直线电机

静电直线电机也可以采用 LIGA 工艺制作。由于静电电机的驱动力与作用面积成正比，而采用 LIGA 工艺可以制作较厚的电极，因此可以得到较大的驱动力。图 5.19-6 为采用 LIGA 工艺制作的直线步进电机。

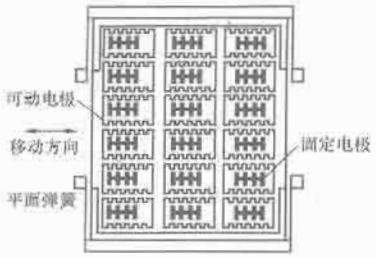


图 5.19-6　静电直线步进电机

（2）旋转型

旋转型静电电机一般是以多晶硅材料制成的，形状为扁平。旋转型静电电动机可以分为顶驱动型、侧驱动型和摆动型三种。

1）顶驱型。顶驱动型旋转静电电机的结构是定子在转子的上面，定子电极与转子电极之间形成电容，电容中电场变化产生一个相对轴承为切向的静电力，直接驱动电机旋转。图 5.19-7 所示的是一个顶驱动型静电电机的部分截面图。

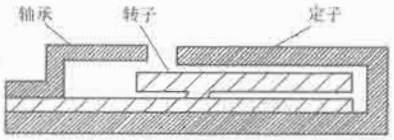


图 5.19-7　顶驱型静电电机的部分截面图

2）侧驱动型。侧驱动型静电电机转子在定子的里面，电能储存在定转子电极间的气隙中，产生静电力的方向相对轴承为切向。图 5.19-8 所示的是采用 IC 工艺用多晶硅制作的步进式静电电机的俯视图与截面图。

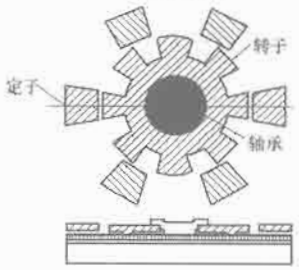


图 5.19-8　步进式静电电机的俯视图与截面图

3）摆动型。摆动型静电电机也称为行波型静电电机。转子的外径比定子的内径小一些。电机运行依靠径向静电力吸引转子向被激励的定子电极方向运动，当按一定顺序激励定子电极，就可以实现转子在定子直径内滚动。图 5.19-9 所示的是一种带有中心轴承的摆动型静电电机的结构简图。

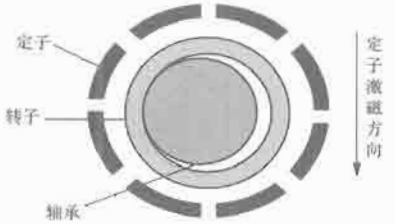


图 5.19-9　摆动型静电电机结构简图

为了提高输出转矩、解决转子的稳定性等问题，有人提出了双定子结构的静电电机、悬浮式静电电机及外转子静电电机等新结构。

(3) 微泵与微阀

静电微泵通常采用面对面运动的静电膜片驱动。图5.19-10所示的微泵由四层体加工的硅结构组成，其中上两层结构为固定电极和可动电极、构成驱动部分，下两层构成入口阀和出口阀。当在电极上施加电压时，可动膜片向上变形，在泵体内形成负压；入口阀在负压作用下打开，液体流入泵体内；无电压时，膜片在弹性力作用下恢复原位，使泵体内的压力增加，这时出口阀在正压力作用下打开，液体排出泵体。通过对电极周期性的施加激励电压，就可以连续不断地从入口吸入液体，并从出口排除，实现微泵的功能。

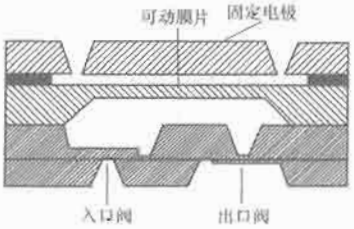


图5.19-10 静电微泵

图5.19-11为采用氧化硅薄膜作为可动电极基底的静电微阀。该阀门利用氧化硅薄膜存在内部应力的现象，使阀门腔体腐蚀成型后得到氧化硅薄膜自然向上拱曲，而在施加电压后使薄膜被吸引到向下拱曲，将阀门入口堵住，从而关闭阀门。

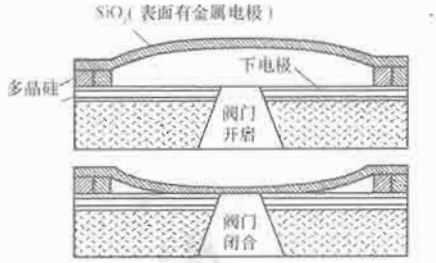


图5.19-11 静电微阀

1.5 应用

目前静电电机大多用于一些不强调功率输出的场合，如光、磁领域。随着微机电系统的不断发展，作为微型机械的动力，静电电机将会在各种纤细复杂的微环境里有着广阔的应用前景，如医疗、航天航空、军事领域等。

2 光热电机与热磁电机

热磁电机的结构示意如图5.19-12所示，转子为铁镍合金制成的圆环，永磁体和红外光源固定在如图所示位置，隔光罩有一窗口以通过光线。其基本工作原理是：由于铁镍磁性材料具有高的磁导率温度系数，当其受到光照而升温时，磁导率会显著下降，如图中的ab段磁导率要下降。若将转子向顺时针方向转一下，根据磁导最大原则，bc段会转至原ab段的位置，而当bc段受光照升温，其磁导率下降后，cd段会转至bc段位置，如此转子会不断地向下一个方向旋转。

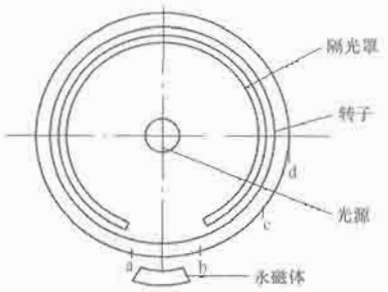


图5.19-12 热磁电机结构示意图

新型整机系统的发展方向是小型化。由于零部件布置紧凑，各种电子元器件产生的热量如何散发出去是个大问题。热磁电机可以直接利用这种热量，因此，只要设计得当，这种电机在新型系统中有发展前途。

3 微波电机与波导电机

微波电机的基本工作原理如图5.19-13（a）所示。环形天线接收的电磁波经二极管整流后，通过*LC*滤波器输至微波电动机的转子绕组，转子绕组中的电流与定子的马蹄形磁铁的磁场作用而产生旋转转矩，使转子带动天线一起旋转，直至天线与电磁波的发射方向平行，天线不在接受电磁波能量为止。如在转子旋转轴上安装几个不同角度的天线，电机就可以连续地旋转。

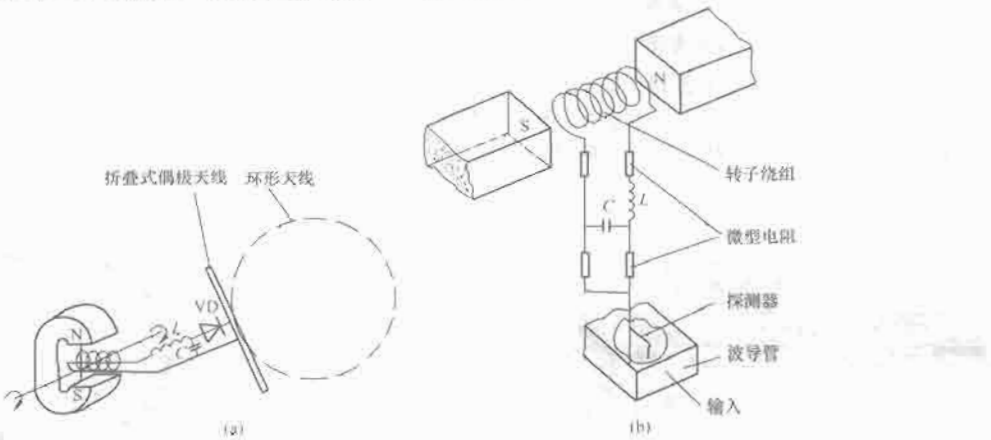


图5.19-13 微波电机与波导电机的工作原理

(a) 微波电机；(b) 波导电机

当无线电波频率提高到3MHz以上时，微波电机的天线需做得很小，从而使功率相应降低，损耗增大，以致不能接收远方发射来的微波能量。在这种情况下，可以采用波导电机。所谓波导电机就是利用传输损耗低、功率容量大、结构简单、易于制造的波导管传输微波能量而使其旋转的微特电机。这种电机的天线（称为探测器）尺寸很小，放置在波

导管内，通过波导管及探测器聚积和接收无线电能量，并输入电机，如图 5.19-13（b）所示。实际上微波电机和波导电机的工作原理无本质的差别。它们在广播、通信领域中（如取代和简化传统无线电定向装置等）有着广阔的发展前景。

4　滚切式电动机

滚切式电动机是一种低转动惯量、低转速的交流电动机，它是利用摆线式行星传动原理和气隙中旋转磁场所产生的磁拉力的巧妙组合而工作的，无需齿轮减速就能获得低转速。滚切式电动机的结构型式很多。

图 5.19-14（a）为一种内摆线滚切式电动机结构示意图。定子两相绕组通电后，在气隙中的旋转磁场所产生的单边磁拉力吸住转子，使其沿着定子内圆做滚切运动。图 5.19-14（b）为其工作原理图，R 为定子内圆半径，r 为转子外圆半径，F 为旋转磁场对转子的磁拉力，F_r 和 F_c 分别为 F 的径向和切向分量。F 的作用方向随旋转磁场一起移动。因此，能使转子沿定子内圆滚切运动。当磁场转过一转时，转子沿定子内圆滚切一周。由于转子外圆的周长小于定子内圆的周长，转子除相对于定子轴线做逆时针方向的公转外，还绕着自身的轴线做顺时针方向的自转，故单边磁场旋转一周，转子自转了 $R/r-1$ 转，减速比为 $R/r-1$。转子转轴的转速为 $n=(R/r-1)n_0$，n_0 为定子旋转磁场转速。由此可见，R 与 r 相差越小，滚切式电动机的转速就越低。

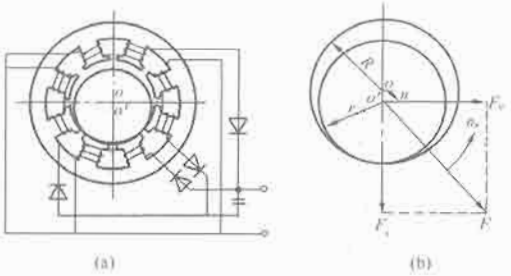


图 5.19-14　滚切式电动机
（a）结构示意图；（b）工作原理图

一般滚切式电动机的转速仅为 10r/min 左右，惯量很小，因此，起、停及正、反转响应时间都很短（约 20ms 以内）。此种电动机从空载到堵转的输入电流变化不大，可长期在堵转状态下运行，其电源除可用交流电源外，也可用脉冲电源供电，步进运行。

5　谐波电动机

谐波电动机是利用旋转磁场所产生的磁拉力与机械谐振波齿轮传动相结合的原理工作的。图 5.19-15（a）为谐波电动机的典型结构示意图。一般做成内定子结构，其上放置着两相交流绕组。内定子铁心外圆的一端装有固定的刚轮，其齿数为 t_s。外转子为由导磁材料做成的薄壁杯形圆筒，在它与刚轮对应的内圆上，装有齿数为 t_r 的柔轮，其外圆是由低损耗硅钢片卷绕成的柔性铁心。

当内定子上的两相交流绕组通电后，气隙中旋转磁场产生的磁拉力使柔性转子铁心（包括杯形圆筒在内）发生椭圆变形，从而使刚轮和柔轮在椭圆的短轴方向啮合，如图 5.19-15（b）所示。当旋转磁场旋转时，转子椭圆变形的短轴随着旋转，刚轮与柔轮的啮合位置亦随着旋转。故当磁场旋转一周时，谐波电动机的转子旋过 $1-t_s/t_r$ 周，即为减速比，转子的转速则为 $n=(1-t_r/t_s)n_0$，n_0 为定子旋转磁场转速。

谐波电动机的减速比可达 100～200 以上，其转速为每

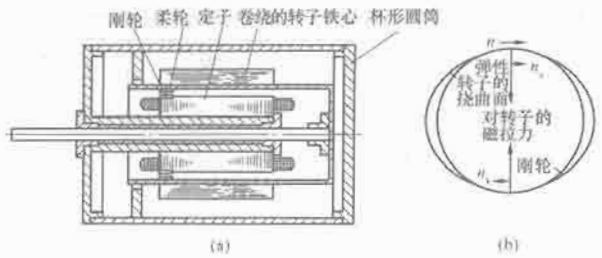


图 5.19-15　谐波电动机
（a）结构示意图；（b）工作原理图

分钟几十转。理论上转速不随负载而变化。这种电动机具有响应速度快、起动电流小、在整个运行范围内电流变化不大，堵转转矩较大，可正、反转工作等优点。因此，它在位置伺服系统中，可作为伺服电动机和力矩电动机使用，配备一定的脉冲电源后，可在步进状态下运行。

6　磁致伸缩驱动器

6.1　磁致伸缩

当磁性体（如金属镍、铁等）的磁化状态改变时，其外形尺寸或体积会发生微小的变化，这就是磁致伸缩效应，又称为焦耳效应。磁致伸缩可分为线磁致伸缩和体积磁致伸缩。

（1）线磁致伸缩

当磁性体被磁化时，沿磁化方向伸长或缩短，称为线磁致伸缩。发生线磁致伸缩时，磁性体的体积几乎不变。当磁化未达到饱和时，主要是产生线磁致伸缩，磁致伸缩一般均指线磁致伸缩。

（2）体积磁致伸缩

磁性体磁化状态改变时，体积发生膨胀或收缩的现象则称为体积磁致伸缩。磁性体磁化饱和以后主要产生体积磁致伸缩。在绝大部分磁性体中，体积磁致伸缩很小，实际的用途也很少。

6.2　磁致伸缩材料和超磁致伸缩材料

（1）磁致伸缩材料

磁致伸缩材料是指具有磁致伸缩效应的磁（电）-机械能转换材料。它的饱和磁致伸缩系数 λ_s 通常为 10^{-6} 数量级。

（2）超磁致伸缩材料

超磁致伸缩材料是具有大磁致伸缩系数的磁致伸缩材料，其 λ_s 一般大于 3.0×10^{-5}。超磁致伸缩材料具有磁致伸缩应变大、强力、机电耦合系数高、响应速度快等优异特性，是制作检测和执行元器件的优良材料。

6.3　超磁致伸缩材料性能

超磁致伸缩材料作为一种新型高效的磁（电）-机械能转换材料，在室温和低磁场下有很大的磁致伸缩系数的三元稀土铁化合物，典型材料为 $Tb_xDy_{1-x}Fe_{2-y}$。其中 x 为 Tb/Dy 之比，y 为 R/Fe 之比，x 一般为 0.27～0.35，y 为 0.01～0.05。这种三元稀土合金材料已实现商品化生产，典型商品牌号为 Terfenol—D 或 Magmek86，代表成分为 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.93}$。

与压电材料（PZT）及传统的磁致伸缩材料镍、钴等相比，超磁致伸缩材料具有独特的性能：在室温下的应变值大，能量密度高，机电耦合系数大，响应速度快（达到 μs 级），输出力大。数据见表 5.19-1。

表 5.19-1 几种常用功能材料的典型性能指标

性能	Terfenol-D	镍	压电陶瓷
化学成分	$Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.93}$	Ni>98%	锆钛酸铅
伸缩应变($\times10^{-3}$)	1.5～2.0	-40	250
密度 (kg/m³)	9.25×10^3	8.9×10^3	7.5×10^3
能量密度 (J/m³)	14000～25000	30	960
机电耦合系数	0.72	0.16～0.25	0.68

6.4 工作原理

一般超磁致伸缩电机以摩擦驱动方式直接输出超磁致伸缩材料的变形位移驱动机械运转。按照其输出的运动方式，超磁致伸缩电机可以分为直线式和旋转式两大类，此外，还有超磁致伸缩谐波电机。

6.4.1 磁致伸缩致动器

超磁致伸缩驱动元件输出位移是电致伸缩致动器的几十倍。图 5.19-16 是定位精度达到纳米级的超磁致伸缩致动器。

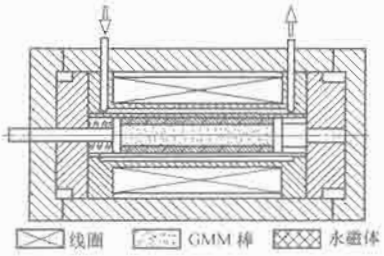


图 5.19-16 超磁致伸缩致动器基本机构

其工作原理为：磁致伸缩材料致动器的性能由 Terfenol-D 合金棒材、偏置磁场、激励磁场和预加压力等因素共同决定。Terfenol-D 合金棒材在预压力及偏置磁场的作用下发生预伸长变形，从而使 Terfenol-D 棒磁致变形工作段处于线性区。通过永久磁铁形成偏置磁场，由压簧板、弹簧和输出杆组成的预压力组件给 Terfenol-D 棒施加预压力。此时，Terfenol-D 合金棒材在外加激励磁场（由电磁线圈提供）作用下，可获得大的轴向磁致伸缩应变。预压力的大小对磁机耦合系数和场耦合系数有一定的影响。适当大小的预压力可提高致动器中电磁能向机械能的转换效率。

6.4.2 旋转式超磁致伸缩电机

旋转式超磁致伸缩电机是利用两个超磁致伸缩振子的机械共振驱动的转动磁致伸缩电机，定子由一个半环形和两个直线形磁致伸缩驱动元件制成，如图 5.19-17 所示。图 5.19-17（a）表示定子直线部分产生的振动正切于连接区域，图 5.19-17（b）表示弯曲部分产生的振动垂直于连接区域，通过定子与转子间的摩擦接触将定子由 90°相位差耦合的椭圆振动传递给与半圆环相连的转子。图 5.19-18 表示定子两部分叠加振动的过程。

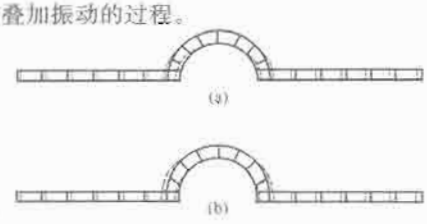


图 5.19-17 旋转式超磁致伸缩电机
（a）移动模型；（b）弯曲模型

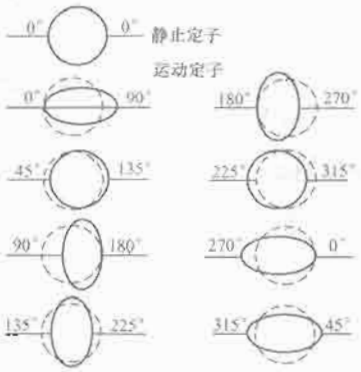


图 5.19-18 定子叠加振动过程

6.4.3 直线式超磁致伸缩电机

具有双边三相定子的直线式超磁致伸缩电机原理如图 5.19-19 所示。超磁致伸缩薄板元件在移动磁场的作用下以蠕动方式运动，其工作原理如下：

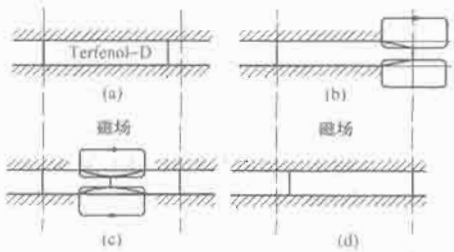


图 5.19-19 直线式超磁致伸缩电机

磁致伸缩元件运动方向与由传统的三相电枢交换产生的运动磁场的方向相反。图 5.19-19（a）表示未通电时的状态，长方形横截面的磁致伸缩薄板元件被限制在两个固定的平面之间，磁致伸缩元件与夹槽之间过盈配合，起到自锁作用。图 5.19-19（b）和图 5.19-19（c）表示在纵向移动磁场作用下磁致伸缩元件的形状和位置，磁力线的方向如图所示，磁场从右向左移动，当磁场开始与元件相互作用时，磁致伸缩元件的一部分沿磁力线方向向右伸长，如图 5.19-19（b）所示；当磁场继续通过磁致伸缩元件时，磁致伸缩元件继续向右蠕动，其延长部分通过滑块传递输出力，如图 5.19-19（c）所示；当磁场完全通过磁致伸缩元件左边时，磁致伸缩元件蠕动到右端，并恢复到它的原始形状与夹槽自锁，以保证恒定的输出力，如图 5.19-19（d）所示。

同样可以采用棒型的超磁致伸缩材料制成的尺蠖式电机，定子采用管状非磁性材料，并与圆柱形的超磁致伸缩棒具有相同的直径。当移动线圈通入电流且位置发生变化时，超磁致伸缩棒运动部分分别在纵向和径向方向上产生磁致伸缩应变，使超磁致伸缩棒交替伸缩，像虫子一样蠕动前进。此外采用超磁致伸缩材料及蠕动原理，可以开发出转动式步进电机。

6.4.4 超磁致伸缩谐波电动机

传统超磁致伸缩电动机的运动精度由超磁致伸缩材料的伸缩位移精度直接决定。由于超磁致伸缩材料的磁致伸缩性能并非完全线性，因此要对电动机进行精密控制。而且，超磁致伸缩材料的性能易受电磁场的干扰，必须采取可靠的磁场屏蔽或消磁措施。在传统超磁致伸缩电动机中，定子（超磁致伸缩材料）与动子依靠相互间摩擦力的作用传递位移和力。由于摩擦的不确定性，位移传递精度受到影响，力的损失较大，而且定子与动子的磨损又加剧了这种缺陷。借鉴谐波电动机的原理，以超磁致伸缩驱动器作为谐波电动机的波

发生器，基于谐波传动原理的超磁致伸缩谐波电动机就克服了传统超磁致伸缩电动机的缺陷。

超磁致伸缩谐波电动机原理结构如图 5.19-20 所示。通过依次控制 8 个（或 8 个以上）超磁致伸缩驱动器的伸缩位移，使柔轮产生流动的弹性变形。根据谐波传动原理，若柔轮固定，刚轮产生低速旋转输出；若刚轮固定，柔轮产生低速旋转输出，实现电磁能到机械能的变换。

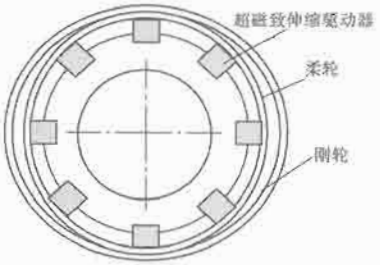


图 5.19-20　超磁致伸缩谐波电动机结构原理图

6.5　应用

基于超磁致伸缩材料的磁(电)-机械换能器具有大位移、强力、响应快、可靠性高、漂移量小、驱动电压低等优点，因而在超精密加工、微马达、振动控制以及流体机械等工程领域均显示出良好的应用前景，是一种很有潜力的新型智能驱动元件。

7　电容式电动机

电容式电动机是一种尺寸小、质量轻、效率高的新型微特电机。其基本工作原理如图 5.19-21 所示。当用金属板制成的双扇形定、转子接上高压直流电源后，定转子的金属片上分别带上异性电荷，由于异性电荷互相吸引，转子朝顺时针方向转动。

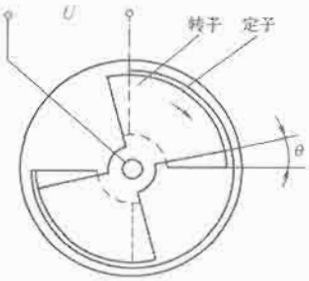


图 5.19-21　电容式电动机基本工作原理

若按图 5.19-22 (a) 的规律通电，即在转子位置角 $\theta=0$ 时通电，至 $\pi/2$ 断电，虽然断电，但转子靠惯性继续转动，转到 $\theta=\pi$ 时，再通电至 $3\pi/2$ 而断电，至 2π 又通电，完成一个周期。通电时，根据异性电荷相吸引的原理而产生驱动转矩，断电时，靠转子本身的惯性而转动。

定转子可做成 2，4，6，8，…个扇形，此数目即为电机的电极数 p，故电容式电动机的旋转速度为

$$n=\frac{60f}{p} \tag{5.19-4}$$

式中，f 为脉冲频率。

亦可加交流电压，如图 5.19-22 (b) 所示。通电后所经历的角度可小于 $\pi/2$。其转速曲线如图 5.19-22 (c) 所示。

电容式电动机的平均功率为

$$P_{av}=\frac{U_{max}^2\omega}{2\pi}(C_{max}-C_{min})=U_{max}^2 f(C_{max}-C_{min}) \tag{5.19-5}$$

式中，U_{max} 为电源电压；ω 为电机旋转角频率；C_{max} 和 C_{min} 为定转子间的最大电容及最小电容。

平均转矩为

$$T_{av}=\frac{U_{max}^2}{2\pi}(C_{max}-C_{min}) \tag{5.19-6}$$

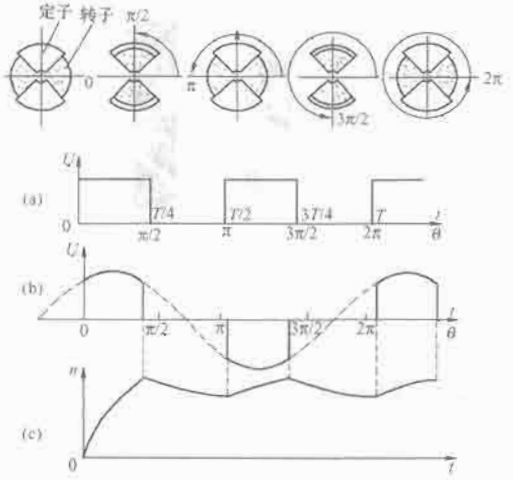


图 5.19-22　电容式电动机旋转原理
(a) 脉冲电压；(b) 交流电压；(c) 转速曲线

由此可知，欲使电容电动机的转矩及功率增大，必须提高电源电压或增大电容器电容的差值。

电容式电动机可以制造成圆柱形结构，定子内圆及转子外圆的表面上铣出许多矩形槽，如图 5.19-23 所示。由图可见，在其他条件相同时，电动机气隙越小，则功率及转矩越大；矩形槽加深，即 d/s 增大，也能在一定范围内提高功率及转矩。电容式电动机无自起动能力，适宜与具有自起动能力的静电异步电动机组合起来使用。

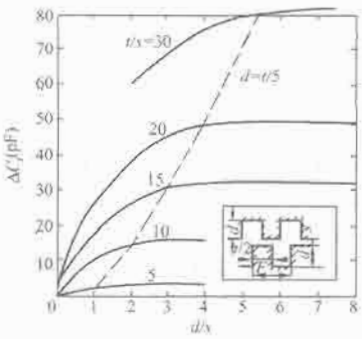


图 5.19-23　圆柱形电容式电动机槽形与电容的变化 ΔC_i 的关系

8　形状记忆合金驱动器

8.1　形状记忆合金

形状记忆合金有温控型和磁控型两种，前者靠温度变化来控制材料的变形，后者是用改变磁场的大小来控制材料的变形。

8.1.1　磁控形状记忆合金

磁控形状记忆合金（MSM）是镍-锰-镓（Ni-Mn-Ga）合金，其磁控形状记忆功能可用磁的各向异性解释。图 5.19-24 为磁场作用下 MSM 晶体结构调整取向的原理示意图。孪晶的短轴（图中的 c 轴）是易磁化方向，在没有外磁场的情况下沿元件的长轴取向，如图 5.19-24 (a) 所示。在外磁场作用下另外的孪晶变异体出现并逐渐增长，如图 5.19-24 (b)

所示孪晶变异体的边界被外磁场所移动。当磁场能量足够大时，晶胞的易磁化轴（c轴）转向外部磁场方向，如图5.19-24（c）所示。在外磁场作用下，MSM元件的长度变化为a/c，即晶胞的长短轴之比。

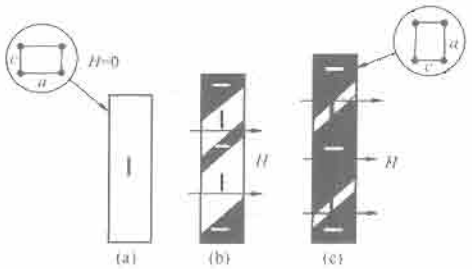


图5.19-24 磁场作用下MSM晶体变形原理示意图

在磁场作用下磁控形状记忆合金变形后具有形状记忆功能，即外磁场去掉后，磁控形状记忆合金保持变形后的形状不变。恢复起原始形状一般有两种方法：一是将磁场方向旋转90°，即沿变形后磁控形状记忆合金的晶胞长轴方向施加磁场，使其在磁场作用下旋转回到原来的位置；二是通过对变形后的磁控形状记忆合金晶胞长轴方向施加一定压力使其恢复原形。

磁控型形状记忆合金不仅变形率大，而且易于控制，变形率与所施加的磁场强度有较好的线性关系，动态相应速度高，是温控型形状记忆合金频率响应的80倍，具有较高的能量转换效率和功率密度。

8.1.2 温控型形状记忆合金

温控型形状记忆合金（SMA）是一种受到温度变化而产生形状变形的材料，实际应用的有镍-钛合金、铜-锌-铝合金，在其形状变形时就会产生力。利用合金材料的这种特性，设计成符合系统要求的执行元件。

温控型形状记忆合金的金相结构在常温下为马氏体状态，当加热到相变温度之后成为奥氏体状态，当温度下降到相变温度以下时又回到马氏体状态。如果在马氏体状态下将温控型形状记忆合金加工成一定形状，然后将其加热到相变温度以上，将使温控型形状记忆合金记住该形状，如图5.19-25所示。该现象可以用温控型形状记忆合金应力应变关系图来解释（见图5.19-26）。当温度低于马氏体转变温度T_{Mf}时，随着温度变化，温控型形状记忆合金仅有少量伸长，即施加恒定的应力时温控型形状记忆合金可以产生较大的变形。然而当温度超过奥氏转变温度T_{Af}时，温控型形状记忆合金恢复到原来的变形形态，同时可以观察到迟滞现象。图中T_{As}和T_{Af}是奥氏体起始和结束时转变温度，T_{Ms}和T_{Mf}是马氏体起始和结束时转变温度。

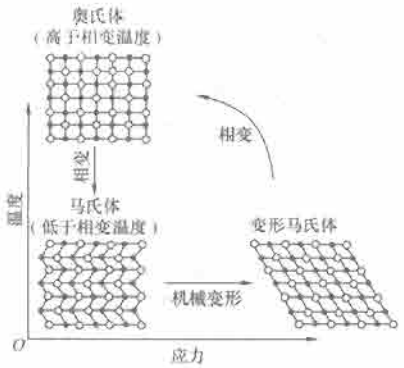


图5.19-25 SMA全相结构转变

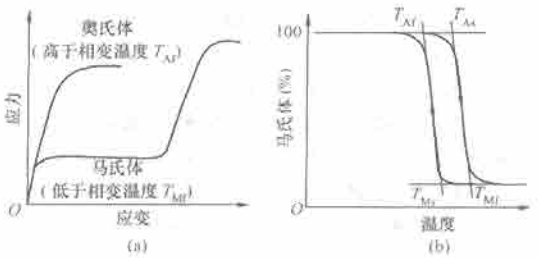


图5.19-26 SMA的应力应变图（a）和迟滞图（b）

温控型形状记忆合金在奥氏体和马氏体状态下的强度差别十分大，有时可以达到10∶1。温控型形状记忆合金执行器是利用了这一特点进行工作。温控型形状记忆合金的变形量可以达到8%，但是超出马氏体的柔顺变形区后，会产生不可恢复的塑性变形。

利用温控型形状记忆合金的形状记忆特性可以制作对环境温度敏感的热响应执行器，也可以利用温控型形状记忆合金的导电特性进行电加热，构成电驱动执行器。

8.2 工作原理

8.2.1 磁控型形状记忆合金执行器

磁控型形状记忆合金执行器的基本结构如图5.19-27所示。电磁铁用以产生磁控型形状记忆合金元件变形所需的可控磁场，水平方向的磁场穿过MSM产生垂直方向的变形。弹簧产生预压力，可以去除磁场作用后使磁控型形状记忆合金恢复原有形状。线性位移控制是最基本和应用最普遍的执行器，其结构和控制也最为简单。采用磁控型形状记忆合金也可产生弯曲和扭转等非直线位移的执行机构，但其结构和控制要复杂一些。

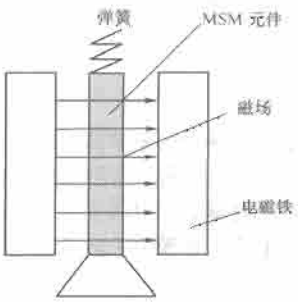


图5.19-27 磁控型形状记忆合金执行器结构原理

8.2.2 蠕动型直线电机工作原理

将磁控型形状记忆合金小步距的位移连续累加形成直线电机所需要的大行程，蠕动型磁控型形状记忆合金直线电机的工作原理如图5.19-28所示。

如图5.19-28所示，在轴向磁场的作用下磁控型形状记忆合金的易磁化方向（晶格短轴方向）趋向于水平方向。欲使直线电机向左运动，将左夹钳松开而右夹钳加紧，如图5.19-28（a）所示。然后将施加磁场方向由轴向改为垂直方向，磁控型形状记忆合金的易磁化方向（晶格短轴方向）因趋向于垂直方向而使磁控型形状记忆合金水平方向伸长，由于轴被右夹钳加紧，磁控型形状记忆合金只能向左伸长，如图5.19-28（b）所示，在去掉垂直方向磁场之前，使左夹钳加紧而松开右夹钳，如图5.19-28（c）所示。当磁场由垂直方向改为水平方向后，因轴被左夹钳夹住，磁控型形状记忆合金在水平方向磁场作用下只能由右向左收缩恢复原形，这样相当于直线电机向左移动一步，如图5.19-28（d）所示。重复上述操作，直线电机便可以连续运动。改变左右夹钳的控制顺序，便可使其反方向运动。

8.3 应用

形状记忆合金已应用于机器人的模拟关节驱动；作为一

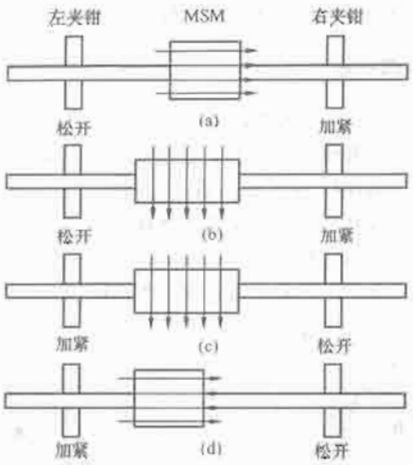


图 5.19-28　蠕动型磁控型形状记忆合金直线电机工作原理

种双位置执行器也在宇宙飞船太阳能矩阵组件和传感器组件以及导弹助推器上获得应用。此外，在主动式内窥镜和导尿管、微型夹持器、控制阀、流量控制等中使用。

9　人工肌肉驱动器

9.1　人工肌肉

人工肌肉主要有两类：一类是气动人工肌肉，其伸缩由控制空气压力来实现；另一类为离子聚合物-金属复合物-离子交换膜金属复合材料（IPMC），它通过外加电场的激励使其伸缩。

离子交换膜金属复合材料是一种新型的智能材料，目前研究和应用的该材料是由阳离子交换膜和铂等贵金属通过化学镀方法复合而成。它的致动性能非常类似于生物肌肉，故称其为“人工肌肉”。这些材料在外加电场作用下能发生体积变化，可制成电致伸缩（弯曲）薄膜，以模仿动物肌肉的收缩运动。人工肌肉的线性变形比可超过 30%（压电聚合物大约只能达到 0.1%），所产生的能量密度要比人体肌肉大 3 个数量级，而且驱动电压很低。它是一种适合于开发仿生机器人的材料。人们利用这种材料，可制作出具有高度的可操纵性、无噪声、动作灵活、可类似模仿人体手臂、鱼类、昆虫等动作的仿生机器人。

9.2　材料特征

9.2.1　离子交换膜金属复合材料的制备

将全氟磺酸离子交换膜（Nafion 117）薄膜进行粗化处理，然后将其浸泡在$[Pt(NH_3)_4]Cl_2$溶液中，利用化学还原过程将薄膜转换为$[Pt(NH_3)_4]^{+2}$形式。通过使用适当的还原剂，可将铂离子还原成铂粒，并使铂粒渗入到薄膜的表层深处。如果仅仅在薄膜表面镀金属，在直流电场的作用下，所镀薄膜将不会产生弯曲响应。

9.2.2　离子交换膜金属复合材料的特性

当给离子交换膜金属复合材料薄膜施加直流电压时，薄膜向阳极弯曲，并且弯曲程度随着电压的增加而上升，直至达到饱和状态，如图 5.19-29 所示。在交流电压下，薄膜产生摆动弯曲，并且其位移取决于电压幅值和频率。通常，在低频时（小于 0.1Hz 或 0.01Hz）产生较大的位移，如果频率上升到几十赫兹时，将不产生位移。不同频率下，弯曲位移达到饱和时的驱动电压值不同，在频率较高时，电压值较小。薄膜的运动受施加电流的控制，但其响应受到离子交换膜金属复合材料中含水量（用作离子传输媒质）的影响。与其他压电陶瓷或形状记忆合金比较，离子交换膜金属复合材料致动器的特点是低电压驱动、大幅值的位移量。

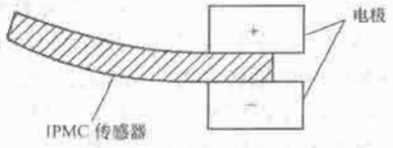


图 5.19-29　置于两电极之间的离子交换膜金属复合材料传感器

9.3　工作原理

离子聚合物-金属复合物是一种主动执行器。当外界存在一个外加低压电场时，这种执行器就会产生较大的变形和较小的依赖性。

从本质上来看，多电解质的分子骨架中具有离子基，这些离子基具有分离特性，可以用不同的溶剂做媒质从而得到净电荷。这些附着在大分子网络上的净电荷团被称为聚合离子，这些聚合离子会产生 10^{10} V/m 量级的强电场，因此这些多电解质系统发生电化学变形的实质是由于它们对外部磁场的敏感性。同样，对内部的场强反映也是如此。特别当多电解质网络空间中充满包含离子的液体时，外加电压就会使结构内部的这些离子发生电泳迁移，结果导致大分子网络产生相应的变形。基于此原理，可以构成许多微电机，这些微电机是采用离子聚合胶制成的。

图 5.19-29 就是基于此原理制作的离子交换膜金属复合材料传感器。当在条形离子交换膜金属复合材料上施加外加电场时，条形离子交换膜金属复合材料会向阳极方向弯曲，如果电压信号反向，弯曲方向也随之变化。反之，通过使材料弯曲变形，外部施加的应力会产生运动电荷迁移，运动的离子会向负电荷区域运动，从而在另一端产生等量的正电荷，这时材料两端一面缺少电荷，一面有电荷过剩，就会导致电压梯度产生，使用低功率放大器就可以进行传感器测量。

9.4　应用

人工肌肉可作为驱动材料用于制造尺寸细小的器件，用于操作细胞、生物器官等；或制成人工假体，用于肢体残障者恢复某些功能；或制成质量轻、能耗低的人工手臂、昆虫机器人、微型舰船及其他仿生机械。

10　压电型微电动机

压电型微电动机是利用压电陶瓷的逆压电效应而获得机械力的新原理超微电动机，在交变电场作用下，将电能转变成机械能。它的独特优点是无噪声，无惯性，力矩介于静电型和电磁型超微电动机之间。压电型超微电动机按其材料的应变形式可分为伸缩式（直线型）和弯曲型（旋转型）。

10.1　制备技术

压电型超微电动机的基本材料是压电陶瓷，首先在其圆柱的侧面上涂复银，然后将其均分成 4 份，中间保留极其微小的间隙，最后经高电压极化处理，使银渗入陶瓷体内部。这些工艺都是在高倍显微镜下完成的。

10.2　压电微执行器

压电微电机是利用压电材料的机电耦合特性来实现驱动的。压电材料在受到机械应力时能够产生电荷，利用这种现象可以制作压电传感器。相反，压电材料在电压作用下又能

够产生变形，利用这种现象可以制作执行器。由于压电材料的变形量十分微小，一般仅在几个 nm/V，单个压电元件的变形量约为总长的 0.1%～0.2%，这在需要精密定位的微操作器中很有意义。在实际应用中，往往将多个压电执行器叠起来，或采取一定的结构型式，以得到较大的位移。

图 5.19-30（a）是以层叠方式工作的压电微执行器，它是由多层压电陶瓷和电极层叠而成。制作方法是将压电陶瓷薄片印刷上电极浆料后叠在一起，放入高炉中烧结而成。陶瓷薄片的厚度为 10～200μm，工作电压为 50～300V。

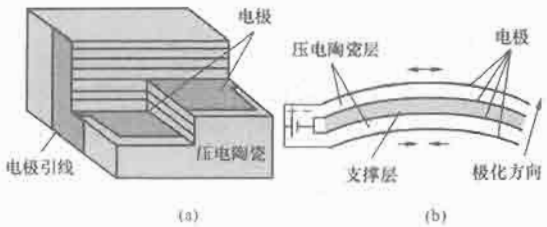


图 5.19-30 压电执行器工作原理

压电微执行器的另一种工作方式为压电悬臂梁，如图 5.19-31（b）所示。压电悬臂梁是在悬臂梁基底材料上、下分别制作一层压电材料和相应的电极。当施加在上、下压电层的电压符号相反时，两层压电膜分别伸长和缩短，从而使悬臂梁弯曲，在悬臂梁末端产生垂直悬臂梁的位移。当施加在两个压电层的电压相同时，悬臂梁伸长或缩短，产生沿悬臂梁方向的位移。

层压式压电执行器具有出力大的优点，但是位移只能达到 20～200μm。悬臂式压电执行器具有位移大的优点，其弯曲位移可以达到 1mm，但是出力较小。

10.3 压电微电机

图 5.19-31 是一个摆线式压电微电机。在定子内壁和转子外壁上分别有内齿和外齿，可以互相咬合。在定子外壁上分别安装了互成 90°的四个压电驱动器，它们将定子卡在中间。当在四个压电驱动器上分别施加互成 90°相位差的交变电压时，四个压电驱动器产生相位差 90°的伸缩运动，从而带动定子做圆周摆动，这时转子由于齿与齿之间的咬合作用被带动发生转动。

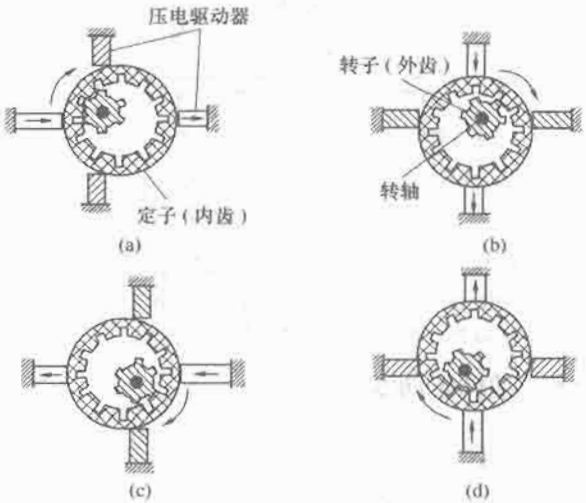


图 5.19-31 摆线式压电微电机

参 考 文 献

[1] 唐任远. 特种电机. 北京：机械工业出版社，1998.

[2] 莫会成. 中国微电机现状及发展趋势. 电器工业，2005(12)：32-35.

[3] 孙建忠，白凤仙. 特种电机及其控制. 北京：中国水利水电出版社，2005.

[4] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计. 北京：机械工业出版社，2000.

[5] 陈世坤. 电机设计. 北京：机械工业出版社，1982.

[6] 陈俊峰. 永磁电机. 北京：机械工业出版社，1983.

[7] 李钟明，刘卫国. 稀土永磁电机. 北京：国防工业出版社，1999.

[8] 王宗培. 永磁直流微电机. 南京：东南大学出版社，1992.

[9] 胡之光. 电机电磁场的分析与计算. 北京：机械工业出版社，1984.

[10] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析. 西安：西安交通大学出版社，1991.

[11] 许实章. 电机学. 北京：机械工业出版社，1981.

[12] 刘哲民. 横向磁通永磁电机：[学位论文]. 沈阳：沈阳工业大学特种电机研究所，2006.

[13] 窦一平. 组合励磁稀土永磁同步发电机的设计研究：[学位论文]. 南京：南京航空航天大学，2003.

[14] 莫会成. 永磁交流伺服电动机的参数分析. 微电机，2003(3).

[15] 莫会成. 永磁交流伺服电动机的设计特点. 微电机，1993(1)：6-9.

[16] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用. 北京：机械工业出版社，2004.

[17] 叶金虎. 永磁无刷电动机的设计. 微电机，2005(3).

[18] 王宗培，谢古明，韩光鲜，程树康. 无槽永磁无刷电动机. 微电机，2002(4).

[19] 权力，牒正文. 永磁无刷电动机的应用. 电气技术，2006(7).

[20] 钱平. 伺服系统. 北京：机械工业出版社，2005.

[21] 郭庆鼎，孙宜标，王丽梅. 现代永磁电动机交流伺服系统. 北京：中国电力出版社，2006.

[22] 刘和平，王维俊，江愉，邓力. TMS320F240X C 语言开发应用. 北京：北京航空航天大学出版社，2003.

[23] 王晓明，王玲. 电动机的 DSP 控制. 北京：北京航空航天大学出版社，2004.

[24] 秦忆. 现代交流伺服系统. 武汉：华中理工大学出版社，1995.

[25] 李忠杰. 步进电动机应用技术. 北京：机械工业出版社，1998.

[26] 刘宝廷，程树康. 步进电动机及其驱动控制系统. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1997.

[27] 詹琼华. 开关磁阻电机. 武汉：华中理工大学出版社，1992.

[28] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术. 北京：机械工业出版社，1995.

[29] 陈坚. 电力电子学. 北京：高等教育出版社，2001.

[30] 常国强. 开关磁阻电机驱动系统的一体化研究与实践：[学位论文]. 武汉：华中理工大学，1999.

[31] 廖海平. 新型永磁式开关磁阻电动机研究：[学位论文]. 杭州：浙江大学，1998.

[32] 励鹤鸣，励庆孚. 电磁减速式电动机. 北京：机械工业出版社，1982.

[33] 西安微电机研究所. 实用微电机手册. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2003.

[34] 上海微电机研究所. 微特电机设计程序. 上海：上海科技出版社，1983.

[35] 秦子斐. 电磁减速式低速同步电动机. 微特电机，1979(1)：46-63.

[36] 星云仪表厂. 磁滞电动机理论与设计. 北京：国防工业出版社，1977.

[37] 凌林本，陈仁康. 气体介质对动力调谐陀螺仪性能的影响机理及调整措施. 中国惯性技术学报，1998(2).

[38] E R Laithwaite. Induction Machines for Special Purpose. New York, Chemical Publishing Company, 1966.

[39] S A Nasar. Linear Motion Electric Machines. New York, A Wiley -Interscience Publication, 1976.

[40] 叶云岳. 直线电机原理与应用. 北京：机械工业出版社，2000.

[41] 叶云岳. 直线电机技术手册. 北京：机械工业出版社，2003.

[42] 浙江大学电机教研室. 直线感应电动机译文集. 北京：科学出版社，1978.

[43] 谭作武，凌金福，恽嘉陵，桂竞存. 往复电动机. 北京：北京出版社，1991.

[44] 马瑞卿，刘卫国. 全数学有限转角无刷力矩电机的位置控制. 微电机，2001(6).

[45] 杨渝钦. 控制电机. 第 2 版. 北京：机械工业出版社，2003.

[46] 秦继荣，沈安俊. 现代直流伺服控制技术及其系统设计. 北京：机械工业出版社，2002.

[47] 曲家骐，王季秩. 伺服控制系统中的传感器. 北京：机械工业出版社，1998.

[48] 顾菊平. 圆柱定子超声波电机及快速定位控制的研究：[学位论文]. 南京：东南大学，2003.

[49] 金龙. 步进超声电机的研究：[博士后研究工作报告]. 南京：东南大学，1999.

[50] 胡敏强，金龙，顾菊平. 超声波电机原理与设计. 北京：科学出版社，2005.

[51] 石斌. 环行行波型超声马达及其驱动控制的研究：[学位论文]. 南京：东南大学，2001.

[52] 金龙. 旋转型压电行波超声马达的研究：[学位论文]. 南京：南京航空航天大学，1997.

[53] 莫岳平. 行波型超声波电机振动分析及实验研究：[学位论文]. 南京：东南大学，2003.

[54] 王欣利，程树康. 静电电动机及其研究发展状况. 微特电机，2001(6)：12-15.

[55] 梅涛，伍小平. 微机电系统. 北京：化学工业出版社，2001.

[56] 贾振元，王福吉，张永顺，郭东明. 超磁致伸缩材料驱动微型马达的原理与应用. 机械工程，2003，14(13)：1161-1164.

[57] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会. 电机工程手册. 第 2 版. 电机卷. 北京：机械工业出版社，1996.

西安微电机研究所

西安微电机研究所——中国微电机的摇篮，1965 年由北京电器科学研究院第五研究室整体内迁西安建所。中国的微电机从这里起步、发展并壮大；从 20 世纪 50 年代开始，这里就造出了第一代自整角机、旋转变压器、磁滞电动机、电机扩大机、交流伺服电动机、罩极电动机和交流换向器电机；为了发展军用微电机，20 世纪 60 年代初学习引进国外技术，创立了我国控制微电机自、旋、伺、测四大系列，为我国军用微电机体系的建立、健全和发展奠定了基础。40 多年来，经过了几代人的艰苦奋斗，西微所为我国微特电机的发展和武器装备工业做出了卓越贡献，成为我国微特电机及伺服控制技术的重要研发基地。

西安微电机研究所现有职工 500 多名，工程技术人员 300 多名，60%以上具有中、高级专业技术职称，是一个集微电机及自动化研究开发和生产于一体的专业研究所。

西微所成立 40 多年来，追踪国外先进技术，引领中国微电机技术潮流，其研究领域几乎涵盖了国内外所有微特电机种类。这些产品广泛应用于航空、航天、船舶、兵器、电子、核工业等国防领域，在冶金、化工、汽车、机床、造纸、印刷、仪器仪表、机器人、电工电器等领域也有广泛的应用。

西微所的发展史即中国微电机的发展史，从无到有，从小到大，人才济济，硕果累累。多年来取得了数百项科技成果，多次荣获中共中央、国务院、中央军委、国防科工委、总装备部、科技部、原机械部和陕西省、西安市的表彰和奖励。

西微所研发队伍训练有素，检测和制造设备精良，质量保证体系完善。2003 年通过 GJB 9001A—2001 及 GB/T 19001—2000 质量体系转版认证；2005 年先后获得国防科工委暨国家保密局颁发的武器装备科研生产单位保密资格证书及国防科工委颁发的武器装备科研生产许可证书。

沈阳工业大学国家稀土永磁电机工程技术研究中心

国家稀土永磁电机工程技术研究中心是依托沈阳工业大学，在沈阳工业大学特种电机研究所的基础上于2002年组建的。

从1978年开始，沈阳工业大学就在国内率先从事稀土永磁电机的自主研发和科技创新。在唐任远院士的带领下，成功地研制出我国首台稀土永磁电机和当时世界容量最大的60～160kVA稀土永磁副励磁机，近年来研制成1120kW异步起动高效永磁同步电动机、超高效永磁电动机、无铁心永磁电动机、横向磁通永磁电机等新产品。为我国稀土资源优势转化为技术、经济优势和提高所配套的技术装备水平作出重大贡献。

30年来，中心在稀土永磁发电机、高效稀土永磁电动机、变频调速稀土永磁电动机、交流永磁伺服电动机、特种永磁电机的研发方面都取得了丰硕成果，并在石油、化工、冶金、纺织、数控机床、工程机械、电梯、风力发电以及军工等领域得到推广和应用；在永磁同步电机磁路设计计算、电抗参数的计算与测试技术、钕铁硼永磁的抗失磁技术、永磁电机性能测试方法和永磁电机振动噪声抑制技术等制约钕铁硼永磁电机发展的共性关键技术研究等方面取得重大进展。先后完成了国家自然科学基金计划项目3项、国家863计划项目5项、国家科技攻关和支撑计划项目3项和一批省部级计划项目。有24项科技成果通过省部级鉴定，其中3项达到"国际领先"水平，其余均达到"国际先进"水平。获国家科技进步奖3项、省部级科技进步奖8项、沈阳市奖2项。获批专利21项(其中发明专利4项)，申请获受理专利24项(其中发明专利9项)。出版了《现代永磁电机理论与设计》等著作11部，发表论文400余篇，其中在著名刊物或国际会议上发表182篇，被三大检索收录了180篇。

中心购置和自制了一批先进、适用的永磁电机检测、试验装置和系统，已具备1000kW以下样机的试制和电磁性能试验条件。

中心承担了本科生、硕士生、博士生和博士后的教学工作。已有2名博士后出站，有25人获得博士学位，89人获得硕士学位，为电机行业培养了大批高层次人才，既有大学校长、国家工程中心主任、研究所所长，也有知名高校的博士生导师和企业的骨干人才。

30年来，中心秉承"拼搏、严谨、创新、攀登"的精神，努力为实现"一流的工程化水平、一流的工程技术人才、一流的工程实验条件、一流的管理运行水平"的目标奋斗，已成为我国永磁电机技术的重要研发基地和人才培养基地。